

ACTAS

DE LAS

XXXVIII Jornadas de Automática

Gijón · Palacio de Congresos · 6, 7 y 8 de Septiembre de 2017



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo



CEA
Comité Español
de Automática

Colabora

Gijón

Convention Bureau

Actas de

XXXVIII

Jornadas de Automática

© 2017 Universidad de Oviedo
© Los autores

Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo
Campus de Humanidades. Edificio de Servicios. 33011 Oviedo (Asturias)
Tel. 985 10 95 03 Fax 985 10 95 07
[http: www.uniovi.es/publicaciones](http://www.uniovi.es/publicaciones)
servipub@uniovi.es

DL AS 2749-2017

ISBN: 978-84-16664-74-0

Todos los derechos reservados. De conformidad con lo dispuesto en la legislación vigente, podrán ser castigados con penas de multa y privación de libertad quienes reproduzcan o plagien, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica, fijada en cualquier tipo y soporte, sin la preceptiva autorización.

Prefacio

Las *Jornadas de Automática* se celebran desde hace **40 años** en una universidad nacional facilitando el encuentro entre expertos en esta área en un foro que permite la puesta en común de las nuevas ideas y proyectos en desarrollo. Al mismo tiempo, propician la siempre necesaria colaboración entre investigadores del ámbito de la Ingeniería de Control y Automática, así como de campos afines, a la hora de abordar complejos proyectos de investigación multidisciplinarios.

En esta ocasión, las Jornadas estarán organizadas por la Universidad de Oviedo y se han celebrado del 6 al 8 de septiembre de 2017 en el Palacio de Congresos de Gijón, colaborando tanto la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón (EPI) como el Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica de Computadores y de Sistemas del que depende el Área de Ingeniería de Sistemas y Automática.

Además de las habituales actividades científicas y culturales, esta edición es muy especial al celebrarse el **50 aniversario de la creación de CEA**, Comité Español de Automática. Igualmente este año se conmemora el 60 aniversario de la Federación Internacional del Control Automático de la que depende CEA. Así se ha llevado a cabo la presentación del libro que se ha realizado bajo la coordinación de D. Sebastián Dormido, sobre la historia de la Automática en España en una sesión en la que han participado todos los ex-presidentes de CEA conjuntamente con el actual, D. Joseba Quevedo.

Igualmente hemos contado con la presencia de conferenciantes de prestigio para las sesiones plenarias, comunicaciones y ponencias orales en las reuniones de los 9 grupos temáticos, contribuciones en formato póster. Se ha celebrado también el concurso de CEABOT, así como una nueva Competición de Drones, con el ánimo de involucrar a más estudiantes de últimos cursos de Grado/Máster.

En el marco de las actividades culturales programadas se ha podido efectuar un recorrido en el casco antiguo situado en torno al Cerro de Santa Catalina y visitar la Laboral.

Gijón, septiembre de 2017

Hilario López
Presidente del Comité Organizador

Program Committee

Antonio Agudo	Institut de Robòtica i Informàtica Industrial
Rosa M Aguilar	University of La Laguna.
Luciano Alonso	University of Cantabria
Ignacio Álvarez García	Universidad de Oviedo
Antonio Javier Artuñedo García	Centre for Automation and Robotics (CSIC-UPM)
José M. Azorín	Miguel Hernandez University of Elche
Pedro Balaguer	Universitat Jaume I
Antonio Javier Barragán Piña	Universidad de Huelva
Alfonso Baños	Universidad de Murcia
Guillermo Bejarano	University of Seville
Gerardo Beruvides	Centro de Automática y Robótica
Carlos Bordons	University of Seville
Jose Manuel Bravo	University of Huelva
Jose Luis Calvo-Rolle	University of A Coruña
Fernando Castaño Romero	Centro de Automática y Robótica (UPM -CSIC)
José Luis Casteleiro-Roca	University of Coruña
Alvaro Castro-Gonzalez	Universidad Carlos III de Madrid
Ramon Costa-Castelló	Universitat Politècnica de Catalunya
Abel A. Cuadrado	University of Oviedo
Arturo De La Escalera	Universidad Carlos III de Madrid
Emma Delgado	Universidad de Vigo
Jose-Luis Diez	Universitat Politècnica de Valencia
Manuel Domínguez	Universidad de León
Juan Manuel Escaño	Universidad de Sevilla
Mario Francisco	University of Salamanca
Maria Jesus Fuente	Universidad de Valladolid
Juan Garrido	Universtiy of Cordoba
Antonio Giménez	Universidad de Almeria
Evelio Gonzalez	Universidad de La Laguna
José-Luis Guzmán	Universidad de Almería
Rodolfo Haber	Center for Automation and Robotics (UPM-CSIC)
César Ernesto Hernández	Universidad de Almería
Eloy Irigoyen	UPV/EHU
Agustin Jimenez	Universidad Politècnica de Madrid
Emilio Jiménez	University of La Rioja
Jesus Lozano	Universidad de Extremadura
Jorge Luis Madrid	Centro de Automática y Robótica
Luis Magdalena	Universidad Politècnica de Madrid
David Martin Gomez	Universidad Carlos III de Madrid
Fernando Matia	Universidad Politecnica de Madrid
Joaquim Melendez	Universitat de Girona
Juan Mendez	Universidad de La Laguna
Luis Moreno	Universidad Carlos III de Madrid
María Dolores Moreno Rabel	Universidad de Extremadura
David Muñoz	Universidad de Sevilla
Antonio José Muñoz-Ramirez	Universidad de Málaga
Jose Luis Navarro	Universidad Politecnica de Valencia
Manuel G. Ortega	University of Seville
Andrzej Pawlowski	UNED
Mercedes Perez de La Parte	University of La Rioja
Ignacio Peñarrocha	Universitat Jaume I de Castelló, Spain
José Luis Pitarch	Universidad de Valladolid

Daniel Pérez	University of Oviedo
Emilio Pérez	Universitat Jaume I
Juan Pérez Oria	Universidad de Cantabria
MiguelÁngel Ridao	Universidad de Sevilla
Gregorio Sainz-Palmero	Universidad de Valladolid
Antonio Sala	Universitat Politecnica de Valencia
Ester Sales-Setién	Universitat Jaume I
Jose Sanchez	UNED
Javier Sanchis Saez	Universitat Politecnica de Valencia (UPV)
José Pedro Santos	ITEFI-CSIC
Matilde Santos	Universidad Complutense de Madrid
Alvaro Serna	University of Valladolid
José Enrique Simó	Universidad Politécnica de Valencia
José A. Somolinos	ETS I Navales. Universidad Politecnica de Madrid
Fernando Tadeo	Univ. of Valladolid
Alejandro Tapia	Universidad de Loyola Andalucía
David Tena	Universitat Jaume I
Jesús Torres	Universidad de La Laguna
Pedro M. Vallejo	Universidad de Salamanca
Guilherme Vianna	Universidad de Sevilla
Alejandro Vignoni	AI2 - UPV
Ramón Vilanova	UAB
Francisco Vázquez	Universidad de Cordoba
Jesús M. Zamarreño	University of Valladolid

Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

Balbastre, Patricia
Beltrán de La Cita, Jorge
Bermudez-Cameo, Jesus
Blanco-Claraco, Jose-Luis
Blanes, Francisco
Bonin-Font, Francisco

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

Garita, Cesar
Gimenez, Antonio
Gruber, Patrick
Guindel, Carlos

Hernandez Ruiz, Alejandro
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

Marin, Raul
Marín Plaza, Pablo
Mañanas, Miguel Angel
Morales, Rafael
Moreno, Francisco-Angel

Núñez, Luis Ramón

Ponz Vila, Aurelio
Posadas-Yague, Juan-Luis
Poza-Luján, Jose-Luis
Pumarola, Albert

Raya, Rafael
Revestido Herrero, Elías
Rocon, Eduardo
Ruiz Sarmiento, José Raúl
Ruiz, Adria

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor

Table of Contents

Ingeniería de Control	
TÚNEL DE AGUA PARA PRUEBAS Y CARACTERIZACIÓN DE DISEÑOS EXPERIMENTALES DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS	1
<i>Eduardo Alvarez, Manuel Rico-Secades, Antonio Javier Calleja Rodríguez, Joaquín Fernández Francos, Aitor Fernández Jiménez, Mario Alvarez Fernández and Samuel Camba Fernández</i>	
Reduction of population variability in protein expression: A control engineering approach.	8
<i>Yadira Boada, Alejandro Vignoni and Jesús Picó</i>	
CONTROL ROBUSTO DEL PH EN FOTOBIORREACTORES MEDIANTE RECHAZO ACTIVO DE PERTURBACIONES	16
<i>José Carreño, Jose Luis Guzman, José Carlos Moreno and Rodolfo Villamizar</i>	
Control reset para maniobra de cambio de carril y validación con CarSim	23
<i>Miguel Cerdeira, Pablo Falcón, Antonio Barreiro, Emma Delgado and Miguel Díaz-Cacho</i>	
Maniobra de aterrizaje automática de una Cessna 172P modelada en FlightGear y controlada desde un programa en C	31
<i>Mario de La Rosa, Antonio Javier Gallego and Eduardo Fernández</i>	
Alternativas para el control de la red eléctrica aislada en parques eólicos marinos	38
<i>Carlos Díaz-Sanahuja, Ignacio Peñarrocha, Ricardo Vidal-Albalade and Ester Sales-Setién</i>	
CONTROL PREDICTIVO DISTRIBUIDO UTILIZANDO MODELOS DIFUSOS PARA LA NEGOCIACIÓN ENTRE AGENTES	46
<i>Lucía Fargallo, Silvana Roxani Revollar Chavez, Mario Francisco, Pastora Vega and Antonio Cembellín</i>	
Control Predictivo en el espacio de estados de un captador solar tipo Fresnel	54
<i>Antonio Javier Gallego, Mario de La Rosa and Eduardo Fernández</i>	
Control predictivo para la operación eficiente de una planta formada por un sistema de desalación solar y un invernadero	62
<i>Juan Diego Gil Vergel, Lidia Roca, Manuel Berenguel, Alba Ruiz Aguirre, Guillermo Zaragoza and Antonio Giménez</i>	
Depuración de Aguas Residuales en la Industria 4.0	70
<i>Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel, Ana María Jiménez Arévalo, Laura Eiroa Mateo and Fco. Javier Fernández-De-Cañete-Rodríguez</i>	
Control robusto con QFT del pH en un fotobiorreactor raceway	77
<i>Ángeles Hoyo Sánchez, Jose Luis Guzman, Jose Carlos Moreno and Manuel Berenguel</i>	
Revisión sistemática de la literatura en ingeniería de sistemas. Caso práctico: técnicas de estimación distribuida de sistemas ciberfísicos	84
<i>Carmelina Ierardi, Luis Orihuela Espina, Isabel Jurado Flores, Álvaro Rodríguez Del Nozal and Alejandro Tapia Córdoba</i>	
Desarrollo de un Controlador Predictivo para Autómatas programables basado en la normativa IEC 61131-3	92
<i>Pablo Krupa, Daniel Limon and Teodoro Alamo</i>	
Diseño de un emulador de aerogenerador de velocidad variable DFIG y control de pitch ...	100
<i>Manuel Lara Ortiz, Juan Garrido Jurado and Francisco Vázquez Serrano</i>	

Observación de la fracción de agua líquida en pilas de combustible tipo PEM de cátodo abierto.....	108
<i>Julio Luna and Ramon Costa-Castelló</i>	
Control Predictivo Basado en Datos.....	115
<i>José María Manzano, Daniel Limón, Teodoro Álamo and Jan Peter Calliess</i>	
Control MPC basado en un modelo LTV para seguimiento de trayectoria con estabilidad garantizada.....	122
<i>Sara Mata, Asier Zubizarreta, Ione Nieva, Itziar Cabanes and Charles Pinto</i>	
Implementación y evaluación de controladores basados en eventos en la norma IEC-61499.....	130
<i>Oscar Miguel-Escrig, Julio-Ariel Romero-Pérez and Esteban Querol-Dolz</i>	
AUTOMATIZACIÓN Y MONITORIZACIÓN DE UNA INSTALACIÓN DE ENSAYO DE MOTORES.....	138
<i>Alfonso Poncela Méndez, Miguel Ochoa Vega, Eduardo J. Moya de La Torre and F. Javier García Ruíz</i>	
OPTIMIZACIÓN Y CONTROL EN CASCADA DE TEMPERATURA DE RECINTO MEDIANTE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN.....	146
<i>David Rodríguez, José Enrique Alonso Alfaya, Guillermo Bejarano Pellicer and Manuel G. Ortega</i>	
Diseño LQ e implementación distribuida para la estimación de estado.....	154
<i>Álvaro Rodríguez Del Nozal, Luis Orihuela, Pablo Millán Gata, Carmelina Ierardi and Alejandro Tapia Córdoba</i>	
Estimación de fugas en un sistema industrial real mediante modelado por señales aditivas.....	160
<i>Ester Sales-Setién, Ignacio Peñarrocha and David Tena</i>	
Advanced control based on MPC ideas for offshore hydrogen production.....	167
<i>Alvaro Serna, Fernando Tadeo and Julio. E Normey-Rico</i>	
Transfer function parameters estimation by symmetric send-on-delta sampling.....	174
<i>José Sánchez, María Guinaldo, Sebastián Dormido and Antonio Visioli</i>	
An Estimation Approach for Process Control based on Asymmetric Oscillations.....	181
<i>José Sánchez, María Guinaldo Losada, Sebastian Dormido, José Luis Fernández Marrón and Antonio Visioli</i>	
Robust PI controller for disturbance attenuation and its application for voltage regulation in islanded microgrid.....	189
<i>Ramon Vilanova, Carles Pedret and Orlando Arrieta</i>	
Infraestructura para explotación de datos de un simulador azucarero.....	197
<i>Jesús M. Zamarreño, Cristian Pablos, Alejandro Merino, L. Felipe Acebes and De Prada César</i>	

Automar

INFRAESTRUCTURA PARA ESTUDIAR ADAPTABILIDAD Y TRANSPARENCIA EN EL CENTRO DE CONTROL VERSÁTIL.....	203
<i>Juan Antonio Bonache Seco, José Antonio Lopez Orozco, Eva Besada Portas and Jesús Manuel de La Cruz</i>	
ARQUITECTURA DE CONTROL HÍBRIDA PARA LA NAVEGACIÓN DE VEHÍCULOS SUBMARINOS NO TRIPULADOS.....	211
<i>Francisco J. Lastra, Jesús A. Trujillo, Francisco J. Velasco and Elías Revestido</i>	

Exploración y Reconstrucción 3D de Fondos Marinos Mediante AUVs y Sensores Acústicos	218
<i>Oscar L. Manrique Garcia, Mario Andrei Garzon Oviedo and Antonio Barrientos</i>	
AUTOMATIZACIÓN DE MANIOBRAS PARA UN TEC DE 2GdL	226
<i>Marina Pérez de La Portilla, José Andrés Somolinos Sánchez, Amable López Piñeiro, Rafael Morales Herrera and Eva Segura</i>	
MERBOTS PROJECT: OVERALL DESCRIPTION, MULTISENSORY AUTONOMOUS PERCEPTION AND GRASPING FOR UNDERWATER ROBOTICS INTERVENTIONS	232
<i>Pedro J. Sanz, Raul Marin, Antonio Peñalver, David Fornas and Diego Centelles</i>	
<hr/> Bioingeniería <hr/>	
MARCADORES CUADRADOS Y DEFORMACIÓN DE OBJETOS EN NAVEGACIÓN QUIRÚRGICA CON REALIDAD AUMENTADA	238
<i>Eliana Aguilar, Oscar Andres Vivas and Jose Maria Sabater-Navarro</i>	
Entrenamiento robótico de la marcha en pacientes con Parálisis Cerebral: definición de objetivos, propuesta de tratamiento e implementación clínica preliminar	244
<i>Cristina Bayón, Teresa Martín-Lorenzo, Beatriz Moral-Saiz, Óscar Ramírez, Álvaro Pérez-Somarriba, Sergio Lerma-Lara, Ignacio Martínez and Eduardo Rocon</i>	
PREDICCIÓN DE ACTIVIDADES DE LA VIDA DIARIA EN ENTORNOS INTELIGENTES PARA PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA	251
<i>Arturo Bertomeu-Motos, Santiago Ezquerro, Juan Antonio Barios, Luis Daniel Lledó, Francisco Javier Badesa and Nicolas Garcia-Aracil</i>	
Sistema de Visión Estereoscópico para el guiado de un Robot Quirúrgico en Operaciones de Cirugía Laparoscópica HALS.....	256
<i>Carlos Castedo Hernández, Rafael Estop Remacha, Eusebio de La Fuente López and Lidia Santos Del Blanco</i>	
Head movement assessment of cerebral palsy users with severe motor disorders when they control a computer thought eye movements.....	264
<i>Alejandro Clemotte, Miguel A. Velasco and Eduardo Rocon</i>	
Diseño de un sensor óptico de fuerza para exoesqueletos de mano.....	270
<i>Jorge Diez Pomares, Andrea Blanco Ivorra, José María Catalan Orts, Francisco Javier Badesa Clemente, José María Sabater and Nicolas Garcia Aracil</i>	
POSIBILIDADES DEL USO DE TRAMAS ARTIFICIALES DE IMAGEN MOTORA PARA UN BCI BASADO EN EEG	276
<i>Josep Dinarès-Ferran, Christoph Guger and Jordi Solé-Casals</i>	
EFFECTOS SOBRE LA ERD EN TAREAS DE CONTROL DE EXOESQUELETO DE MANO EMPLEANDO BCI.....	282
<i>Santiago Ezquerro, Juan Antonio Barios, Arturo Bertomeu-Motos, Luisa Lorente, Nuria Requena, Irene Delegido, Francisco Javier Badesa and Nicolas Garcia-Aracil</i>	
Formulación Topológica Adaptada para la Simulación y Control de Exoesqueletos Accionados con Transmisiones Harmonic Drive	288
<i>Andres Hidalgo Romero and Eduardo Rocon</i>	

Identificación de contracciones isométricas de la extremidad superior en pacientes con lesión medular incompleta mediante características espectrales de la electromiografía de alta densidad (HD-EMG)	296
<i>Mislav Jordanic, Mónica Rojas-Martínez, Joan Francesc Alonso, Carolina Migliorelli and Miguel Ángel Mañanas</i>	
Diseño de una plataforma para analizar el efecto de la estimulación mecánica aferente en el temblor de pacientes con temblor esencial	302
<i>Julio S. Lora, Roberto López, Jesús González de La Aleja and Eduardo Rocon</i>	
DEFINICIÓN DE UN PROTOCOLO PARA LA MEDIDA PRECISA DEL RANGO CERVICAL EMPLEANDO TECNOLOGÍA INERCIAL	308
<i>Álvaro Martín, Rafael Raya, Cristina Sánchez, Rodrigo Garcia-Carmona, Oscar Ramirez and Abraham Otero</i>	
SISTEMA BRAIN-COMPUTER INTEFACE DE NAVEGACIÓN WEB ORIENTADO A PERSONAS CON GRAVE DISCAPACIDAD.....	313
<i>Víctor Martínez-Cagigal, Javier Gómez-Pilar, Daniel Álvarez, Eduardo Santamaría-Vázquez and Roberto Hornero</i>	
ESTRATEGIAS DE NEUROESTIMULACIÓN TRANSCRANEAL POR CORRIENTE DIRECTA PARA MEJORA COGNITIVA	320
<i>Silvia Moreno Serrano, Mario Ortiz and José María Azorín Poveda</i>	
COMPARATIVA DE ALGORITMOS PARA LA DETECCIÓN ONLINE DE IMAGINACIÓN MOTORA DE LA MARCHA BASADO EN SEÑALES DE EEG	328
<i>Marisol Rodriguez-Ugarte, Irma Nayeli Angulo Sherman, Eduardo Iáñez and Jose M. Azorin</i>	
DETECCIÓN, MEDIANTE UN GUANTE SENSORIZADO, DE MOVIMIENTOS SELECCIONADOS EN UN SISTEMA ROBOTIZADO COLABORATIVO PARA HALS	334
<i>Lidia Santos, José Luis González, Eusebio de La Fuente, Juan Carlos Fraile and Javier Pérez Turiel</i>	
BIOSENSORES PARA CONTROL Y SEGUIMIENTO PATOLOGÍAS REUMATOIDES	340
<i>Amparo Tirado, Raúl Marín, José V Martí, Miguel Belmonte and Pedro Sanz</i>	
Assessment of tremor severity in patients with essential tremor using smartwatches	347
<i>Miguel A. Velasco, Roberto López-Blanco, Juan P. Romero, M. Dolores Del Castillo, J. Ignacio Serrano, Julián Benito-León and Eduardo Rocon</i>	
INTERFAZ CEREBRO-ORDENADOR PARA EL CONTROL DE UNA SILLA DE RUEDAS A TRAVÉS DE DOS PARADIGMAS DE NAVEGACIÓN	353
<i>Fernández-Rodríguez Álvaro, Velasco-Álvarez Francisco and Ricardo Ron-Angevin</i>	
<hr/> Control Inteligente <hr/>	
Aprendizaje por Refuerzo para sistemas lineales discretos con dinámica desconocida: Simulación y Aplicación a un Sistema Electromecánico	360
<i>Henry Diaz, Antonio Sala and Leopoldo Armesto</i>	
Diseño de sistemas de control en cascada clásico y borroso para el seguimiento de trayectorias	368
<i>Javier G. Gonzalez, Rodolfo Haber, Fernando Matia and Marcelino Novo</i>	

ANÁLISIS FORMAL DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS NO LINEALES MEDIANTE REDES NEURONALES.....	376
<i>Eloy Irigoyen, Mikel Larrea, A. Javier Barragán, Miguel Ángel Martínez and José Manuel Andújar</i>	
Predicción de la energía renovable proveniente del oleaje en las islas de Fuerteventura y Lanzarote.	384
<i>G.Nicolás Marichal, Deivis Avila, Ángela Hernández, Isidro Padrón and José Ángel Rodríguez</i>	
Aplicación de Redes Neuronales para la Estimación de la Resistencia al Avance en Buques	393
<i>Daniel Marón Blanco and Matilde Santos</i>	
Novel Fuzzy Torque Vectoring Controller for Electric Vehicles with per-wheel Motors	401
<i>Alberto Parra, Martín Dendaluce, Asier Zubizarreta and Joshué Pérez</i>	
REPOSTAJE EN TIERRA DE UN AVIÓN MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS .	408
<i>Elías Plaza and Matilde Santos</i>	
VISUALIZACIÓN WEB INTERACTIVA PARA EL ANÁLISIS DEL CHATTER EN LAMINACIÓN EN FRÍO.....	416
<i>Daniel Pérez López, Abel Alberto Cuadrado Vega and Ignacio Díaz Blanco</i>	
BANCADA PARA ANÁLISIS INTELIGENTE DE DATOS EN MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL.....	424
<i>Daniel Pérez López, Diego García Pérez, Ignacio Díaz Blanco and Abel Alberto Cuadrado Vega</i>	
CONTROL DE UN VEHÍCULO CUATRIRROTOR BASADO EN REDES NEURONALES.....	431
<i>Jesus Enrique Sierra and Matilde Santos</i>	
CONTROL PREDICTIVO FUZZY CON APLICACIÓN A LA DEPURACIÓN BIOLÓGICA DE FANGOS ACTIVADOS.....	437
<i>Pedro M. Vallejo Llamas and Pastora Vega Cruz</i>	
<hr/> Educación en Automática <hr/>	
REFLEXIONES SOBRE EL VALOR DOCENTE DE UNA COMPETICION DE DRONES EN LA EDUCACIÓN PARA EL CONTROL	445
<i>Ignacio Díaz Blanco, Alvaro Escanciano Urigüen, Antonio Robles Alvarez and Hilario López García</i>	
Uso del Haptic Paddle con aprendizaje basado en proyectos	451
<i>Juan M. Gandarias, Antonio José Muñoz-Ramírez and Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel</i>	
REPRESENTACION INTEGRADA DE ACCIONAMIENTOS MECANICOS Y CONTROL DE EJES ORIENTADA A LA COMUNICACIÓN Y DOCENCIA EN MECATRONICA	457
<i>Julio Garrido Campos, David Santos Esterán, Juan Sáez López and José Ignacio Armesto Quiroga</i>	
Construcción y modelado de un prototipo fan & plate para prácticas de control automático	465
<i>Cristina Lampon, Javier Martin, Ramon Costa-Castelló and Muppaneni Lokesh Chowdary</i>	

EDUCACION EN AUTOMATICA E INDUSTRIA 4.0 MEDIANTE LA APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS 3D	471
<i>Jose Ramon Llata, Esther Gonzalez-Sarabia, Carlos Torre-Ferrero and Ramon Sancibrian</i>	
Desarrollo e implementación de un sistema de control en una planta piloto hibrida.....	479
<i>Maria P. Marcos, Cesar de Prada and Jose Luis Pitarch</i>	
LA INFORMÁTICA INDUSTRIAL EN LAS INGENIERÍAS INDUSTRIALES	486
<i>Rogelio Mazaeda, Eusebio de La Fuente López, José Luis González, Eduardo J. Moya de La Torre, Miguel Angel García Blanco, Javier García Ruiz, María Jesús de La Fuente Aparicio, Gregorio Sainz Palmero and Smaranda Cristea</i>	
Ventajas docentes de un flotador magnético para la experimentación de técnicas control ..	495
<i>Eduardo Montijano, Carlos Bernal, Carlos Sagües, Antonio Bono and Jesús Sergio Artal</i>	
PROGRAMACIÓN ATRACTIVA DE PLC	502
<i>Eduardo J. Moya de La Torre, F. Javier García Ruiz, Alfonso Poncela Méndez and Victor Barrio Lángara</i>	
MODERNIZACIÓN DE EQUIPO FEEDBACK MS-150 PARA EL APRENDIZAJE ACTIVO EN INGENIERÍA DE CONTROL	510
<i>Perfecto Reguera Acevedo, Miguel Ángel Prada Medrano, Antonio Morán Álvarez, Juan José Fuertes Martínez, Manuel Domínguez González and Serafín Alonso Castro</i>	
INNOVACIÓN PEDAGÓGICA EN LA FORMACIÓN DEL PERFIL PROFESIONAL PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL A TRAVÉS DE UNA APROXIMACIÓN HOLÍSTICA.....	517
<i>Juan Carlos Ríos, Zaneta Babel, Daniel Martínez, José María Paredes, Luis Alonso, Pablo Hernández, Alejandro García, David Álvarez, Jorge Miranda, Constantino Manuel Valdés and Jesús Alonso</i>	
Aprendiendo Simulación de Eventos Discretos con JaamSim	522
<i>Enrique Teruel and Rosario Aragüés</i>	
RED NEURONAL AUTORREGRESIVA NO LINEAL CON ENTRADAS EXÓGENAS PARA LA PREDICCIÓN DEL ELECTROENCEFALOGRAMA FETAL...	528
<i>Rosa M Aguilar, Jesús Torres and Carlos Martín</i>	
ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MATERIA EN REACTORES RACEWAYS.....	534
<i>Marta Barceló, Jose Luis Guzman, Francisco Gabriel Acién, Ismael Martín and Jorge Antonio Sánchez</i>	
MODELADO DINÁMICO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE FRÍO VINCULADO A UN CICLO DE REFRIGERACIÓN	539
<i>Guillermo Bejarano Pellicer, José Joaquín Suffo, Manuel Vargas and Manuel G. Ortega</i>	
Predictor Intervalar basado en hiperplano soporte	547
<i>José Manuel Bravo Caro, Manuel Vasallo Vázquez, Emilian Cojocarú and Teodoro Alamo Cantarero</i>	
Dynamic simulation applied to refinery hydrogen networks	555
<i>Anibal Galan Prado, Cesar De Prada, Gloria Gutierrez, Rafael Gonzalez and Daniel Sarabia</i>	

APROXIMACIÓN DE MODELOS ALGEBRAICOS MEDIANTE ALAMO Y ECOSIMPRO	563
<i>Carlos Gómez Palacín, José Luis Pitarch, Gloria Gutiérrez and Cesar De Prada</i>	
A Causal Model to Analyze Aircraft Collision Avoidance Deadlock Scenarios	569
<i>Miquel Àngel Piera Eroles, Julia de Homdedeu, Maria Del Mar Tous, Thimjo Koca and Marko Radanovic</i>	
ONLINE DECISION SUPPORT FOR AN EVAPORATION NETWORK	575
<i>José Luis Pitarch, Marc Kalliski, Carlos Gómez Palacín, Christian Jasch and Cesar De Prada</i>	
Predicción de la irradiancia a partir de datos de satélite mediante deep learning	582
<i>Javier Pérez, Jorge Segarra-Tamarit, Hector Beltran, Carlos Ariño, José Carlos Alfonso Gil, Aleks Attanasio and Emilio Pérez</i>	
MODELO DINÁMICO ORIENTADO AL TRATAMIENTO Y SEGUIMIENTO DE LA LEUCEMIA MIELOIDE CRÓNICA	589
<i>Gabriel Pérez Rodríguez and Fernando Morilla</i>	
Modelado y optimización de la operación de un sistema de bombeo de múltiples depósitos	596
<i>Roberto Sanchis Llopis and Ignacio Peñarrocha</i>	
DEVELOPMENT OF A GREY MODEL FOR A MEDIUM DENSITY FIBREBOARD DRYER IN ECOSIMPRO	604
<i>Pedro Santos, Jose Luis Pitarch and César de Prada</i>	
DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE FALLOS MEDIANTE MONITORIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LAS FECHAS DE LIMPIEZA PARA INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS	611
<i>Jorge Segarra-Tamarit, Emilio Pérez, Hector Beltran, Enrique Belenguer and José Luis Gandía</i>	
Modelado de micro-central hidráulica para el diseño de controladores con aplicación en regiones aisladas de Honduras	618
<i>Alejandro Tapia Córdoba, Pablo Millán Gata, Fabio Gómez-Estern Aguilar, Carmelina Ierardi and Álvaro Rodríguez Del Nozal</i>	
FRAMEWORK PARA EL MODELADO DE UN LAGO DE DATOS	626
<i>J.M Torres, R.M. Aguilar, C.A. Martín and S. Díaz</i>	
SIMULADOR CARDIOVASCULAR PARA ENSAYO DE ROBOTS DE NAVEGACION AUTONOMA	633
<i>José Emilio Traver, Juan Francisco Ortega Morán, Ines Tejado, J. Blas Pagador, Fei Sun, Raquel Pérez-Aloe, Blas M. Vinagre and F. Miguel Sánchez Margallo</i>	
PLANIFICACION DE LA PRODUCCION BASADA EN CONTROL PREDICTIVO PARA PLANTAS TERMOSOLARES	641
<i>Manuel Jesús Vassallo Vázquez, José Manuel Bravo Caro, Emilian Cojocaru and Manuel Emilio Gegundez Arias</i>	
Evaluación multicriterio para la optimización de redes de energía	649
<i>Ascensión Zafra Cabeza, Rafael Espinosa, Miguel Àngel Ridao Carlini and Carlos Bordóns Alba</i>	
Percibiendo el entorno en los robots sociales del RoboticsLab	657
<i>Fernando Alonso Martín, Jose Carlos Castillo Montoya, Àlvaro Castro-Gonzalez, Juan José Gamboa, Marcos Maroto Gómez, Sara Marqués Villaroya, Antonio J. Pérez Vidal and Miguel Àngel Salichs</i>	

DISEÑO DE UNA PRÓTESIS DE MANO ADAPTABLE AL CRECIMIENTO	664
<i>Marta Ayats and Raul Suarez</i>	
COOPERATIVISMO BIOINSPIRADO BASADO EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS HORMIGAS	672
<i>Brayan Bermudez, Kristel Novoa and Miguel Valbuena</i>	
PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE UN EXOESQUELETO DE MIEMBRO SUPERIOR PARA SOPORTE DE CARGAS	680
<i>Andrea Blanco Ivorra, Jorge Diez Pomares, David Lopez Perez, Francisco Javier Badesa Clemente, Miguel Ignacio Sanchez and Nicolas Garcia Aracil</i>	
Estructura de control en ROS y modos de marcha basados en máquinas de estados de un robot hexápodo	686
<i>Raúl Cebolla Arroyo, Jorge De Leon Rivas and Antonio Barrientos</i>	
USING AN UAV TO GUIDE THE TELEOPERATION OF A MOBILE MANIPULATOR	694
<i>Josep Arnau Claret and Luis Basañez</i>	
Estudio de los patrones de marcha para un robot hexápodo en tareas de búsqueda y rescate	701
<i>Jorge De León Rivas and Antonio Barrientos</i>	
SISTEMA DE INTERACCIÓN VISUAL PARA UN ROBOT SOCIAL	709
<i>Mario Domínguez López, Eduardo Zalama Casanova, Jaime Gómez García-Bermejo and Samuel Marcos Pablos</i>	
Mejora del Comportamiento Proxémico de un Robot Autónomo mediante Motores de Inteligencia Artificial Desarrollados para Plataformas de Videojuegos	717
<i>David Fernández Chaves, Javier Monroy and Javier Gonzalez-Jimenez</i>	
Micrófonos de contacto: una alternativa para sensado táctil en robots sociales	724
<i>Juan José Gamboa, Fernando Alonso Martín, Jose Carlos Castillo, Marcos Maroto Gómez and Miguel A. Salichs</i>	
Clasificación de información táctil para la detección de personas	732
<i>Juan M. Gandarias, Jesús M. Gómez-De-Gabriel and Alfonso García-Cerezo</i>	
Planificación para interceptación de objetivos: Integración del Método Fast Marching y Risk-RRT	738
<i>David Alfredo Garzon Ramos, Mario Andrei Garzon Oviedo and Antonio Barrientos</i>	
ESTABILIZACIÓN DE UNA BOLA SOBRE UN PLANO UTILIZANDO UN ROBOT PARALELO 6-RSS	746
<i>Daniel González, Lluís Ros and Federico Thomas</i>	
TELEOPERACIÓN DE INSTRUMENTOS QUIRÚRGICOS ARTICULADOS	754
<i>Ana Gómez Delgado, Carlos Perez-Del-Pulgar, Antonio Reina Terol and Victor Muñoz Martinez</i>	
CONTROL OF A ROBOTIC ARM FOR TRANSPORTING OBJECTS BASED ON NEURO-FUZZY LEARNING VISUAL INFORMATION	760
<i>Juan Hernández Vicén, Santiago Martínez de La Casa Díaz and Carlos Balaguer</i>	
PLATAFORMA BASADA EN LA INTEGRACIÓN DE MATLAB Y ROS PARA LA DOCENCIA DE ROBÓTICA DE SERVICIO	766
<i>Carlos G. Juan, Jose Maria Vicente, Alvaro Garcia and Jose Maria Sabater-Navarro</i>	

Estimadores de fuerza y movimiento para el control de un robot de rehabilitación de extremidad superior.....	772
<i>Aitziber Mancisidor, Asier Zubizarreta, Itziar Cabanes, Pablo Bengoa and Asier Brull</i>	
Definiendo los elementos que constituyen un robot social portable de bajo coste	780
<i>Marcos Maroto Gómez, José Carlos Castillo, Fernando Alonso-Martín, Juan José Gamboa, Sara Marqués Villarroja and Miguel Ángel Salichs</i>	
Interfaces táctiles para Interacción Humano-Robot	787
<i>Sara Marqués Villarroja, Jose Carlos Castillo Montoya, Fernando Alonso Martín, Marcos Maroto Gómez, Juan José Gamboa and Miguel A. Salichs</i>	
HERRAMIENTAS DE ENTRENAMIENTO Y MONITORIZACIÓN PARA EL DESMINADO HUMANITARIO	793
<i>Hector Montes, Roemi Fernandez, Pablo Gonzalez de Santos and Manuel Armada</i>	
Control a Baja Velocidad de una Rueda con Motor de Accionamiento Directo mediante Ingeniería Basada en Modelos	799
<i>Antonio José Muñoz-Ramirez, Jesús Manuel Luque-Bedmar, Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel, Anthony Mandow, Javier Serón and Alfonso Garcia-Cerezo</i>	
SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS AUTÓNOMOS USANDO V-REP BAJO ROS	806
<i>Cándido Otero Moreira, Enrique Paz Domonte, Rafael Sanz Dominguez, Joaquín López Fernández, Rafael Barea, Eduardo Romera, Eduardo Molinos, Roberto Arroyo, Luís Miguel Bergasa and Elena López</i>	
Cinemática y prototipado de un manipulador paralelo con centro de rotación remoto para robótica quirúrgica.....	814
<i>Francisco Pastor, Juan M. Gandarias and Jesús M. Gómez-De-Gabriel</i>	
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE SINGULARIDADES AISLADAS EN ROBOTS PARALELOS MEDIANTE DESARROLLOS DE TAYLOR DE SEGUNDO ORDEN.....	821
<i>Adrián Peidro Vidal, Óscar Reinoso, Arturo Gil, José María Marín and Luis Payá</i>	
INTERFAZ DE CONTROL PARA UN ROBOT MANIPULADOR MEDIANTE REALIDAD VIRTUAL	829
<i>Elena Peña-Tapia, Juan Jesús Roldán, Mario Garzón, Andrés Martín-Barrio and Antonio Barrientos</i>	
Evolución de la robótica social y nuevas tendencias	836
<i>Antonio J. Pérez Vidal, Alvaro Castro-Gonzalez, Fernando Alonso Martín, Jose Carlos Castillo Montoya and Miguel A. Salichs</i>	
DISEÑO MECÁNICO DE UN ASISTENTE ROBÓTICO CAMARÓGRAFO CON APRENDIZAJE COGNITIVO	844
<i>Irene Rivas-Blanco, M Carmen López-Casado, Carlos Pérez-Del-Pulgar, Francisco García-Vacas, Víctor Fernando Muñoz, Enrique Bauzano and Juan Carlos Fraile</i>	
CÁLCULO DE FUERZAS DE CONTACTO PARA PRENSIONES BIMANUALES.....	852
<i>Francisco Abiud Rojas-De-Silva and Raul Suarez</i>	
Modelado del Contexto Geométrico para el Reconocimiento de Objetos.....	860
<i>José Raúl Ruiz Sarmiento, Cipriano Galindo and Javier Gonzalez-Jimenez</i>	
Estimación Probabilística de Áreas de Emisión de Gases con un Robot Móvil Mediante la Integración Temporal de Observaciones de Gas y Viento	868
<i>Carlos Sanchez-Garrido, Javier Monroy and Javier Gonzalez-Jimenez</i>	

MANIPULADOR AÉREO CON BRAZOS ANTROPOMÓRFICOS DE ARTICULACIONES FLEXIBLES	876
<i>Alejandro Suarez, Guillermo Heredia and Anibal Ollero</i>	
EVALUACIÓN DE UN ENTORNO DE TELEOPERACIÓN CON ROS	864
<i>David Vargas Frutos, Juan Carlos Ramos Martínez, José Luis Samper Escudero, Miguel Ángel Sánchez-Urán González and Manuel Ferre Pérez</i>	

Sistemas de Tiempo Real

GENERACIÓN DE CÓDIGO IEC 61131-3 A PARTIR DE DISEÑOS EN GRAFCET....	892
<i>Maria Luz Alvarez Gutierrez, Isabel Sarachaga Gonzalez, Arantzazu Burgos Fernandez, Nagore Iriondo Urbistazu and Marga Marcos Muñoz</i>	
CONTROL EN TIEMPO REAL Y SUPERVISIÓN DE PROCESOS MEDIANTE SERVIDORES OPC-UA	900
<i>Francisco Blanes Noguera and Andrés Benlloch Faus</i>	
Control de la Ejecución en Sistemas de Criticidad Mixta	906
<i>Alfons Crespo, Patricia Balbastre, Jose Simo and Javier Coronel</i>	
GENERACIÓN AUTOMÁTICA DEL PROYECTO DE AUTOMATIZACIÓN TIA PORTAL PARA MÁQUINAS MODULARES	913
<i>Darío Orive, Aintzane Armentia, Eneko Fernandez and Marga Marcos</i>	
DDS en el desarrollo de sistemas distribuidos heterogéneos con soporte para criticidad mixta	921
<i>Hector Perez and J. Javier Gutiérrez</i>	
ARQUITECTURA DISTRIBUIDA PARA EL CONTROL AUTÓNOMO DE DRONES EN INTERIOR	929
<i>Jose-Luis Poza-Luján, Juan-Luis Posadas-Yagüe, Giovanni-Javier Tipantuña-Topanta, Francisco Abad and Ramón Mollá</i>	
Ingeniería Conducida por Modelos en Sistemas de Automatización Flexibles	935
<i>Rafael Priego, Elisabet Estévez, Darío Orive, Isabel Sarachaga and Marga Marcos</i>	
Estudio e implementación de Middleware para aplicaciones de control distribuido	942
<i>Jose Simo, Jose-Luis Poza-Lujan, Juan-Luis Posadas-Yaguë and Francisco Blanes</i>	

Visión por Computador

Real-Time Image Mosaicking for Mapping and Exploration Purposes	948
<i>Abdulla Al-Kaff, Juan Camilo Soto Triviño, Raúl Sosa San Frutos, Arturo de La Escalera and José María Armingol Moreno</i>	
ALGORITMO DE SLAM UTILIZANDO APARIENCIA GLOBAL DE IMÁGENES OMNIDIRECCIONALES	956
<i>Yerai Berenguer, Luis Payá, Mónica Ballesta, Luis Miguel Jiménez, Sergio Cebollada and Oscar Reinoso</i>	
Medición de Oximetría de Pulso mediante Imagen fotopletiométrica.....	964
<i>Juan-Carlos Cobos-Torres, Jordan Ortega Rodríguez, Pablo J. Alhama Blanco and Mohamed Abderrahim</i>	
Algoritmo de captura de movimiento basado en visión por computador para la teleoperación de robots humanoides.....	970
<i>Juan Miguel Garcia Haro and Santiago Martinez de La Casa</i>	

COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE DETECCIÓN DE ROSTROS EN IMÁGENES DIGITALES	976
<i>Natalia García Del Prado, Victor Gonzalez Castro, Enrique Alegre and Eduardo Fidalgo Fernández</i>	
LOCALIZACIÓN DEL PUNTO DE FUGA PARA SISTEMA DE DETECCIÓN DE LÍNEAS DE CARRIL.....	983
<i>Manuel Ibarra-Arenado, Tardi Tjahjadi, Sandra Robla-Gómez and Juan Pérez-Oria</i>	
Oculus-Crawl, a Software Tool for Building Datasets for Computer Vision Tasks.....	991
<i>Iván De Paz Centeno, Eduardo Fidalgo Fernández, Enrique Alegre Gutiérrez and Wesam Al Nabki</i>	
Clasificación automática de obstáculos empleando escáner láser y visión por computador..	999
<i>Aurelio Ponz, Fernando Garcia, David Martin, Arturo de La Escalera and Jose Maria Armingol</i>	
T-SCAN: OBTENCIÓN DE NUBES DE PUNTOS CON COLOR Y TEMPERATURA EN INTERIOR DE EDIFICIOS	1007
<i>Tomás Prado, Blanca Quintana, Samuel A. Prieto and Antonio Adan</i>	
EVALUACIÓN DE MÉTODOS PARA REALIZAR RESÚMENES AUTOMÁTICOS DE VÍDEOS.....	1015
<i>Pablo Rubio, Eduardo Fidalgo, Enrique Alegre and Víctor González</i>	
SIMULADOR PARA LA CREACIÓN DE MUNDOS VIRTUALES PARA LA ASISTENCIA A PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA EN SILLA DE RUEDAS.	1023
<i>Carlos Sánchez Sánchez, María Cidoncha Jiménez, Emiliano Pérez, Ines Tejado and Blas M. Vinagre</i>	
Calibración Extrínseca de un Conjunto de Cámaras RGB-D sobre un Robot Móvil	1031
<i>David Zúñiga-Nöel, Rubén Gómez Ojeda, Francisco-Ángel Moreno and Javier González Jiménez</i>	

TÚNEL DE AGUA PARA PRUEBAS Y CARACTERIZACIÓN DE DISEÑOS EXPERIMENTALES DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS

Eduardo Álvarez Álvarez ⁽¹⁾, Aitor Fernández Jiménez ⁽¹⁾, Manuel Rico-Secades ⁽²⁾, Antonio Javier Calleja Rodríguez ⁽²⁾, Joaquín Fernández Francos ⁽¹⁾, Mario Álvarez Fernández ⁽²⁾, Samuel Camba Fernández ⁽²⁾

⁽¹⁾Área de Ingeniería Hidráulica, Campus de Mieres, Calle Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n, 33600 Mieres
edualvarez@uniovi.es; jffrancos@uniovi.es; UO216958@uniovi.es

⁽²⁾ Grupo ce3i2-EPI Gijón. Campus de Gijón. Calle Pedro Puig Adam. Edif. 3, 33204 Gijón
mrico@uniovi.es; calleja@uniovi.es; mario.alvarezfdez96@gmail.com; samu_laluz@hotmail.com

Resumen

Este artículo describe el diseño de una infraestructura de tipo túnel de agua que ha sido construida y puesta en marcha en la Escuela Politécnica de Mieres (EPM, Universidad de Oviedo). El túnel ha sido concebido como un equipamiento que permite realizar ensayos de distintos prototipos de turbinas hidrocinéticas.

Incluye un sistema hidráulico calculado para, mediante una recirculación entre dos tanques, lograr velocidades de agua elevadas en un canal, y un sistema de control (hardware y software) que permite ajustar distintos parámetros hidráulicos (velocidad y cota de la lámina de agua) y realizar el control de funcionamiento de la microturbina a ensayar.

Mediante la utilización del túnel se podrán caracterizar distintos diseños de turbina y estrategias de control de las mismas.

Palabras Clave: Túnel de agua, turbina hidrocinética, Electrónica de potencia, Generador de imanes permanentes (PMG).

1 INTRODUCCIÓN

Las turbinas hidrocinéticas generan potencia eléctrica sin precisar de presas u otra estructura, aprovechando directamente las corrientes de agua en ríos, canales o en el mar. Dicha potencia es función de la densidad del agua, sección transversal al flujo del área barrida por las palas, la velocidad de la corriente al cubo y la eficiencia del equipo (Khan et al., 2009).

Para su funcionamiento estas turbinas precisan de un mínimo de velocidad y profundidad de agua, siendo la energía que generan predecible, y por tanto de elevada fiabilidad, por cuanto las corrientes de agua no fluctúan de manera tan intensa como lo hace el viento (Yuce and Muratoglu, 2015).

Las pequeñas unidades de turbinas hidrocinéticas o microturbinas (potencias del orden de Watios o kWatios), instaladas en lugares próximos al consumo eléctrico (corrientes de agua de ríos o estuarios) se presentan como una alternativa viable de generación distribuida para el futuro próximo (Vermaak et al., 2014).

La intensa investigación que actualmente se desarrolla en el ámbito de las microturbinas hidrocinéticas ha impulsado la utilización distintas infraestructuras específicas para evaluación de funcionamiento de pilotos tanto a gran escala (e.j. Centro Europeo de Energía Marina, EMEC en Orkney, Escocia ("The European Marine Energy Centre Ltd," n.d.)), como a escala de laboratorio (e.j. Emeson cavitation tunnel en la Universidad de Newcastle, Inglaterra ("Emerson Cavitation Tunnel," n.d.))

En este artículo se presenta una descripción del túnel de agua construido en la Escuela Politécnica de Mieres de la Universidad de Oviedo (Figura 1(a) y (b)) y que ha sido diseñado específicamente para realizar pruebas experimentales de prototipos de microturbinas hidrocinéticas de eje vertical a escala de laboratorio.

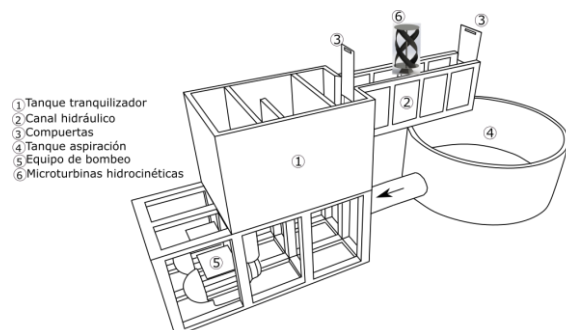


Figura 1(a): Esquema de diseño del túnel de agua



Figura 1(b): Túnel de agua instalado

El diseño del túnel se ha previsto para evaluar microturbinas de eje vertical al ser posible obtener aprovechamientos optimizados de energía mediante disposiciones matriciales de turbinas de este tipo (Alvarez et al., 2016).

El túnel consta de un sistema hidráulico compuesto por canal de flujo rápido, tanque de tranquilización, tanque de aspiración, compuertas de regulación, equipo de bombeo para recirculación (ver Figura 1); y un sistema de control que incluye tanto equipamiento hardware como software que permitirá monitorizar variables, implementar las distintas estrategias de control y realizar distintas pruebas de caracterización de las turbinas. En concreto se describe el procedimiento diseñado para la realización de las pruebas de caracterización del coeficiente de potencia de una microturbina.

El túnel dispone adicionalmente de un sistema que permite la adaptación rápida de distintos componentes del conjunto de la microturbinas de eje vertical.

2 DISEÑO DEL TÚNEL

Para su descripción el túnel de agua se ha dividido en dos sistemas: sistema hidráulico y sistema de control.

2.1 SISTEMA HIDRÁULICO

En la Figura 1(a) se muestra el esquema del sistema hidráulico del túnel identificando sus componentes, que se detallan a continuación.

- 1) Tanque de tranquilización. Este tanque es de acero inoxidable y rectangular, de 1 m³ de capacidad. Recibe agua de las bombas de recirculación y está provisto de un conjunto de deflectores de flujo para rotura de turbulencia, generando un reservorio de agua a velocidad nula antes de su incorporación al canal.
- 2) Canal hidráulico de sección rectangular de 0,5m de alto, 0,3 m ancho y una longitud de 1,5 m. El canal se ha construido mediante cristal transparente sobre estructura de acero,

permitiendo realizar filmaciones de los distintos ensayos a realizar.

- 3) Conjunto de dos compuertas de acero inoxidable planas, rectangulares, que se deslizan sobre guías. Permiten regular tanto el caudal a circular por el canal como la curva de remanso en la finalización del mismo.
- 4) Tanque de aspiración de equipo de bombeo. Este tanque tiene 2 m³ de capacidad y está construido en fibra de vidrio. Recoge el agua proveniente del canal, permitiendo la aspiración del equipo de bombeo.
- 5) Equipo de bombeo. El equipo está compuesto por dos bombas hidráulicas de 300 m³/h y 15 kW de potencia cada una. Estas bombas que aspirarán el agua del tanque de fibra de vidrio enviándolo al tanque metálico situado por encima de su boca de impulsión. Cada una de ellas está alimentada por un variador electrónico (OMRON 3G3Rx-A4220-E1F) que permite el apagado, encendido y la regulación del caudal aportado mediante la variación de frecuencia de alimentación.
- 6) Sistema para colocación de microturbinas hidrocineéticas (ver Figura 2). Está basado en un conjunto de piezas que permiten la adaptación de distintos elementos mecánicos que componen los prototipos de microturbina de eje vertical. Ha sido construido utilizando fundamentalmente metacrilato lo cual permite filmar el flujo desde distintas posiciones.

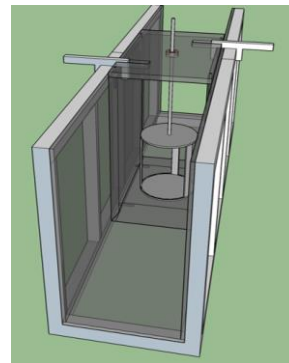


Figura 2: Sistema de colocación de microturbinas en canal

2.2 MONITORIZACIÓN Y CONTROL

El túnel de agua ha sido dotado de un sistema de monitorización y control, denominado Sistema TURTLE (Turbine Test Laboratory Equipment). El sistema permite ajustar automáticamente la velocidad del flujo a un valor requerido, y mantener la cota del agua en el canal en el valor necesario para realizar las pruebas de cada turbina. Asimismo, el sistema realiza el control de los equipos electrónicos encargados de

la producción de energía eléctrica de las turbinas ensayadas. Permite, por tanto, implementar y evaluar distintas estrategias de control y caracterizar el comportamiento de la turbina ante distintas condiciones de flujo.

a) Principio básico de funcionamiento del sistema TURTLE

La Figura 3 recoge el principio básico de funcionamiento del sistema TURTLE. Este consiste en controlar la velocidad del agua en la salida del tanque tranquilizador (v_s), y por tanto la utilizada como referencia en la prueba de la turbina, manteniendo cota de la lámina de agua en un nivel que asegure las pruebas de la turbina.

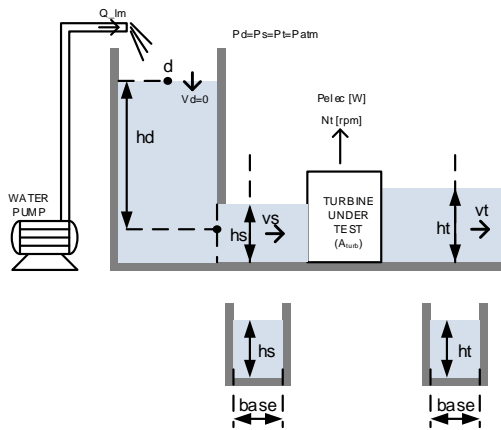


Figura 3: Principio básico de funcionamiento del sistema TURTLE.

Mediante un sistema cerrado de agua se bombea agua desde el tanque de aspiración (referencia 4 de la Figura 1) al tanque tranquilizador (referencia 1 de la Figura 1). Las variaciones de niveles en los tanques donde las bombas aspiran o impulsan prácticamente no afectan al caudal que impulsa cada bomba, fijándose este, mediante ajuste de la frecuencia de alimentación en cada variador.

Conocida la cota del agua en el tanque de tranquilización respecto al punto medio de la profundidad del canal en la boca de salida (hd), es posible calcular la velocidad de salida (ecuación de Torricelli),

$$v_s = \sqrt{hd \cdot g} \quad (1)$$

Donde el valor de g es la aceleración de la gravedad.

Asimismo, se ha de verificar la ecuación de continuidad en el canal:

$$Q = b \cdot h_s \cdot v_s = b \cdot h_t \cdot v_t \quad (2)$$

Donde b es el ancho del canal, h_s y h_t son las alturas del agua antes y después del punto de ensayo de la

turbina y donde v_s y v_t son las velocidades del agua en esos puntos.

Por tanto, la velocidad (v_s) puede ser regulada según dos opciones: utilizando el valor de altura en el depósito de tranquilización (h_d) o utilizando el caudal circulante (Q) y la cota de la lámina de agua antes de la turbina (h_s).

Conocida la dinámica del sistema en distintas pruebas, se decide que la regulación de velocidad se realizará utilizando la compuerta en la descarga del canal para mantener constante la altura h_s (al valor necesario para prueba de turbinas), realizando el ajuste de velocidad mediante variación del caudal circulante (Q).

Así, con un caudal de $300 \text{ m}^3/\text{h}$ ($5 \text{ m}^3/\text{min}$), un ancho del canal de 0.3 m y una altura de la lámina de agua (h_s) de 0.3 m , se obtendría una velocidad de salida de 0.926 m/s . La relación entre caudal en m^3/min y velocidad de salida en m/s se ha representado en la siguiente Figura 4.

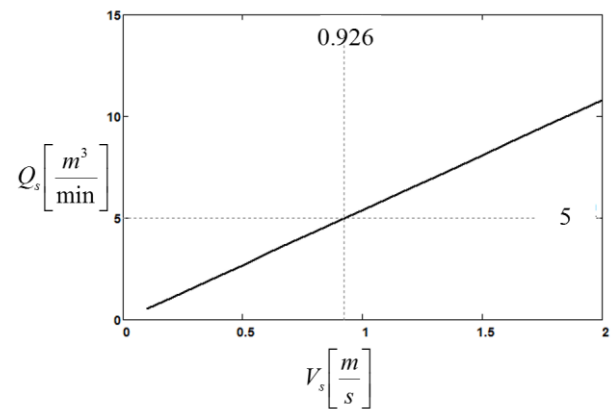


Figura 4: Relación entre caudal en las bombas y velocidad de salida (v_s).

Para la velocidad anteriormente mencionada de 0.926 m/s la altura estimada del depósito de agua respecto a la salida utilizando la ecuación (1) es de 4.371 cm . Al igual que en el caso anterior se muestra una gráfica (Figura 5) que relaciona la altura del depósito (hd) con la velocidad de salida del agua.

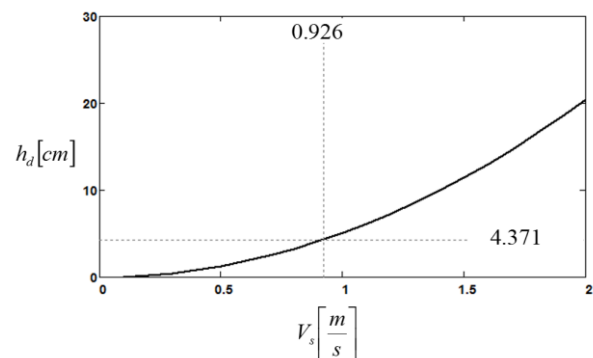


Figura 5: Relación entre la altura de agua del depósito en cm (hd_cm) con la velocidad de salida del agua.

b) Elementos del sistema TURTLE

Para realizar todas las medidas y caracterizaciones indicadas en el apartado anterior, el sistema TURTLE consta de distintos elementos tanto software y hardware indicados en la Figura 6.

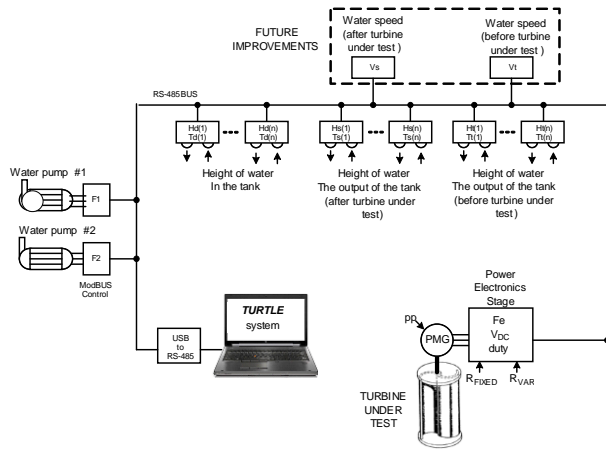


Figura 6: Componentes del sistema TURTLE

Se dispone de sensores ultrasónicos para la medida de nivel de agua tanto en tanque tranquilizador (punto d), como en el canal hidráulico antes del punto de ensayo de la turbina (punto s) como en el mismo canal hidráulico después del punto de ensayo de la turbina (punto t).

En cada punto se realizarán varias medidas para aumentar la precisión en la estimación de la altura de la lámina de agua y promediar las fluctuaciones y turbulencias que se produzcan en esta durante el proceso de ensayo. Las medidas se han denotado como hd (1) hasta hd (n), hs (1) hasta hs (n) y ht (1) hasta ht (n), respectivamente para los puntos d, s y t anteriormente mencionados. Los sensores utilizados permiten también la medida de temperatura ambiental que también estará disponible en distintos puntos del banco de ensayo por si fueran precisas para futuras estimaciones o trabajos.

El sistema también dispone del equipamiento de electrónica de potencia necesario para realizar pruebas a distintos tipos de turbinas; así como conexión con los variadores de velocidad de bombas para ajuste de caudales y medidas de parámetros de funcionamiento de las mismas.

Todos los elementos del sistema TURTLE están conectados a un bus de comunicaciones RS-485 que permite la recogida y procesado de los datos desde un programa informático desarrollado a medida

(TURTLE software) en un entorno IDE de Visual Studio y programado en C#.

3 ENSAYO DE OBTENCIÓN DE LA CARACTERÍSTICA DEL COEFICIENTE DE POTENCIA

El sistema TURTLE permitirá la obtención de la característica del coeficiente de potencia utilizando medidas de parámetros hidráulicos y eléctricos sirviendo ambas medidas de contraste y verificación. Para ambos casos ha de considerarse la potencia hidráulica máxima teórica que puede ser extraída por la turbina y la definición del Coeficiente de Potencia (C_p):

$$P_{teo} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_{turb} \cdot v_s^3 \quad (3)$$

$$C_p = \frac{P_{elec}}{P_{teo}} \quad (4)$$

Siendo, P_{teo} la máxima potencia hidráulica teórica obtenida por la turbina, P_{elec} es la potencia eléctrica generada por la turbina, C_p el Coeficiente de Potencia, A_{turb} el área barrida por las palas de la turbina en dirección transversal al flujo de agua.

Por otro lado, la característica del coeficiente de potencia ha de expresarse para distintas velocidades específicas (Tip Speed Ratio-TSR),

$$TSR = \frac{\omega \cdot R_{tur}}{v_s} \quad (5)$$

Donde ω es la velocidad angular de la turbina, R_{tur} es el radio de la turbina y v_s es la velocidad del fluido en el punto de ensayo.

Para completar pruebas con distintos valores de TSR estos se obtienen variando (mediante el sistema de control) la velocidad angular de giro de la turbina durante el ensayo, manteniendo constante la velocidad del fluido. Esto se realizará utilizando los equipos de electrónica de potencia que dentro de TURTLE realizan el control de la turbina.

La turbina bajo test estará conectada a un generador de imanes permanentes (PMG) de un número de polos conocido. Por tanto, la velocidad angular de giro de la turbina se obtiene, mediante la medida de la frecuencia eléctrica de la señal de tensión del generador, teniendo en cuenta la expresión,

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot Fe}{pp} \quad (6)$$

Donde pp es el número de polos del PMG, y Fe es la frecuencia eléctrica de la señal de tensión.

La tensión trifásica producida por este generador estará conectada al sistema electrónico de potencia de control de turbina. Este está conectado al bus de comunicaciones RS-485 y permite enviar al software de control información relativa a las medidas de potencia y velocidad angular en la turbina bajo ensayo.

a) Medida del coeficiente de potencia mediante parámetros hidráulicos

En este caso se aplica el teorema de Bernoulli y la ecuación de continuidad en los puntos anteriores (s) y posteriores (t) al ensayo de la turbina y, suponiendo que durante el ensayo se extrae una potencia eléctrica ($Pelec$) se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot b \cdot h_s \cdot v_s^3 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot b \cdot h_t \cdot v_t^3 + \frac{Pelec}{\eta} \quad (7)$$

$$b \cdot h_s \cdot v_s = b \cdot h_t \cdot v_t \quad (8)$$

Donde η representa el rendimiento electro mecánico de la microturbina.

Sustituyendo la ecuación (7) en la (8) y despejando la potencia eléctrica ($Pelec$) se obtiene,

$$Pelec = \eta \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \left(\frac{h_s}{h_t} \right)^2 \right) \cdot \rho \cdot b \cdot h_s \cdot v_s^3 \quad (9)$$

La potencia eléctrica podremos pues calcularla a partir de las cotas de las láminas de agua, anchura del canal, la velocidad de salida del depósito tranquilizador, el rendimiento electro mecánico de la misma.

Asimismo, sustituyendo (9) y (3) en (4) se obtiene,

$$Cp = \frac{\eta \cdot b \cdot h_s}{A_{turb}} \cdot \left(1 - \left(\frac{h_s}{h_t} \right)^2 \right) \quad (10)$$

Se puede por tanto calcular el coeficiente de potencia a partir de las cotas de las láminas de agua en el canal, su anchura, el área barrida por las palas de la turbina y su rendimiento.

A modo de ejemplo, en la Figura 7 se muestra la evolución de la potencia eléctrica en vatios generada en la turbina de $A_{turb}=0.04 \text{ m}^2$, para la velocidad calculada en el apartado anterior de 0.926 m/s , suponiendo una altura de entrada en la lámina de agua (h_s) de 0.3 m .

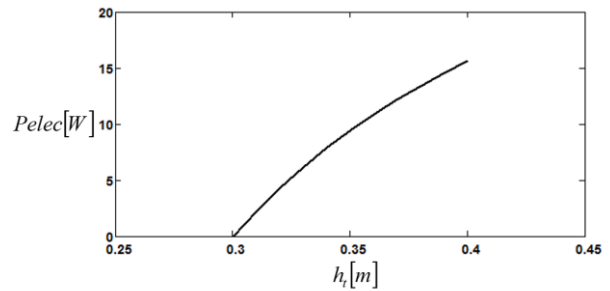


Figura 7: Potencia eléctrica extraída en la turbina bajo ensayo, en función de la altura de la lámina de agua a la salida del ensayo.

De igual forma, en la Figura 8 se muestra la evolución del Coeficiente de Potencia (Cp), en valores por unidad, para los mismos datos anteriores.

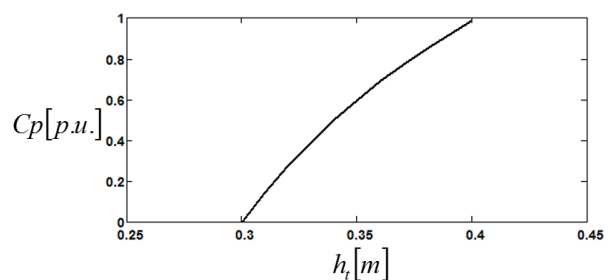


Figura 8: Evolución del coeficiente de potencia (Cp) en función de la altura de la lámina de agua a la salida del ensayo.

b) Medida del coeficiente de potencia mediante parámetros eléctricos

Esta medida se basa en obtener mediante parámetros eléctricos la medida potencia eléctrica ($Pelec$) durante el ensayo.

El sistema de potencia realizará su ensayo utilizando una carga de potencia fija (R_{FIXED}) y una variable (R_{VAR}). El ciclo de trabajo (d) del circuito de potencia y la medida de la tensión continua de trabajo (V_{DC}) en el circuito de potencia permitirá fijar la potencia eléctrica extraída en la turbina en el nivel deseado durante el ensayo.

$$P_{elec} = \frac{V_{DC}}{R_{FIXED}} + \frac{V_{DC}}{R_{VAR}} \cdot d \quad (11)$$

La etapa electrónica de potencia estará conectada al sistema informático (TURTLE software) permitiendo a este la recogida de datos eléctricos durante el ensayo o modificar la potencia eléctrica extraída en la turbina, ambas operaciones en tiempo real durante el ensayo. A modo de ejemplo, se muestran en la Figura 9 diferentes ensayos que se pueden realizar para obtener el coeficiente de potencia (Cp) de una turbina bajo ensayo y extraer el punto de máxima eficiencia (MPP) que servirá como base para el

diseño del circuito electrónico que optimizará la extracción de energía eléctrica (MPPT-Maximum Power Point Tracking).

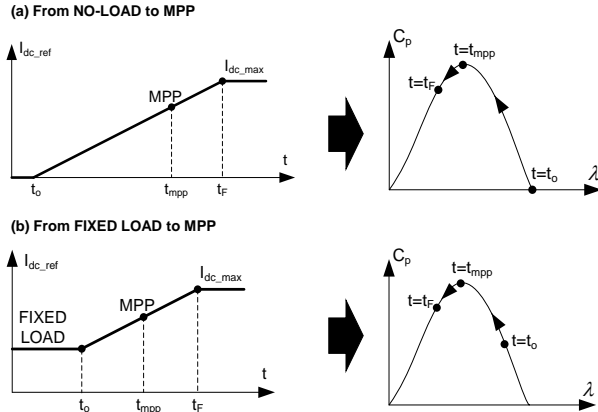


Figura 9: Ensayos para obtención del coeficiente de potencia (C_p) de la turbina bajo ensayo.

c) Descripción de la etapa de potencia para el ensayo de la turbina.

La Figura 10 recoge de manera simplificada la etapa de potencia utilizada para el ensayo de la turbina bajo test.

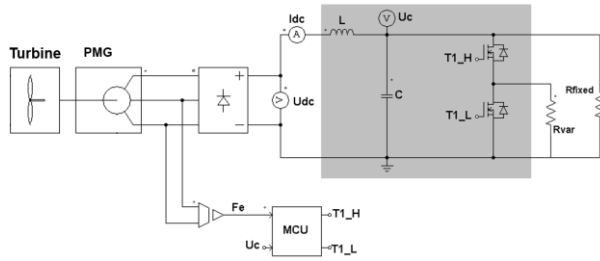


Figura 10: Esquema eléctrico simplificado de la etapa de potencia.

La etapa de potencia consta de un rectificador trifásico, un filtro LC y una rama de transistores Mosfet que conmutan a alta frecuencia (50 kHz). En el trabajo se utiliza su ciclo de conducción (d) como variable de control del sistema.

Una resistencia fija (R_{fixed}) conectada directamente al bus de continua generado por el filtro LC (tensión U_c) y una resistencia (R_{var}) que conectaremos a la rama de transistores Mosfet y que nos permitirá modificar la corriente extraída del rectificador trifásico (I_{dc}).

El análisis dinámico detallado de esta etapa de potencia no ha sido incluido en este trabajo, pero de él se han obtenido los siguientes resultados.

El punto de funcionamiento del sistema está caracterizado por las ecuaciones (12) y (13), que permiten la prealimentación del sistema para llevarlo

de una forma cómoda al entorno del punto de funcionamiento.

$$I_{DC} = \left(\frac{D}{R_{var}} + \frac{1}{R_{fixed}} \right) \cdot U_{DC} \quad (12)$$

$$U_{DC} = U_C \quad (13)$$

La Figura 11 recoge el esquema de regulación completo de la etapa de potencia, que nos permitirá realizar los ensayos de la turbina de una manera precisa.

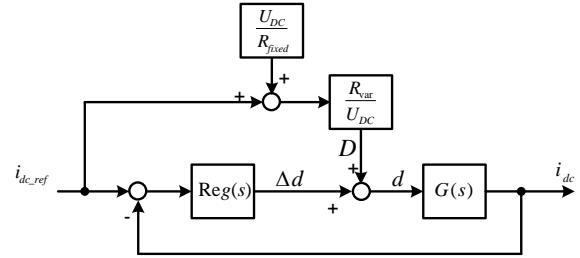


Figura 11: Esquema de regulación de la etapa de potencia.

La función de transferencia del sistema está recogida en la ecuación (14), correspondiendo a un sistema de segundo orden

$$G(s) = \frac{U_{DC}}{L \cdot C \cdot s^2 + L \cdot \left(D + \frac{R_{var}}{R_{fixed}} \right) \cdot s + R_{var}} \quad (14)$$

Para los ensayos, se ha utilizado un regulador digital tipo PI que ha sido implementado en un microcontrolador del Microchip dsPIC30F3012.

Un prototipo de laboratorio de la etapa de potencia está recogido en la figura 12, donde se han rotulado todos los elementos anteriormente descritos.

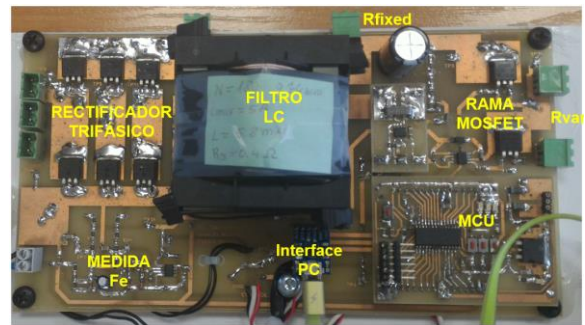


Figura 12: Prototipo de laboratorio de la etapa de potencia.

4 CONCLUSIONES

Se ha presentado y descrito el Túnel de agua recientemente puesto en marcha en la Escuela

Politécnica de Mieres (EPM). Esta infraestructura incluye un sistema hidráulico y un sistema de control, denominado sistema TURTLE.

El túnel ha sido diseñado para poder trabajar con distintos prototipos de turbinas hidrocinéticas, permitiendo su caracterización mediante tests automáticos y la implementación/evaluación de distintas estrategias de control de las mismas.

Asimismo, se ha descrito el test automático que permite la obtención de la característica de coeficiente de potencia de una microturbina.

Referencias

Alvarez, E.A., Rico-Secades, M., Suárez, D.F., Gutiérrez-Trashorras, A.J., Fernández-Francos, J., 2016. Obtaining energy from tidal microturbines: A practical example in the Nalón River. *Appl. Energy* 183, 100–112. doi:10.1016/j.apenergy.2016.08.173

Emerson Cavitation Tunnel [WWW Document], n.d. URL <http://research.ncl.ac.uk/cavitation/> (accessed 7.29.17).

Khan, M.J., Bhuyan, G., Iqbal, M.T., Quaicoe, J.E., 2009. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review. *Appl. Energy* 86, 1823–1835. doi:10.1016/j.apenergy.2009.02.017

The European Marine Energy Centre Ltd [WWW Document], n.d. URL http://www.emec.org.uk/wave_energy_devices.asp (accessed 1.4.17).

Vermaak, H.J., Kusakana, K., Koko, S.P., 2014. Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 29, 625–633. doi:10.1016/j.rser.2013.08.066

Yuce, M.I., Muratoglu, A., 2015. Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 43, 72–82. doi:10.1016/j.rser.2014.10.037

Reduction of population variability in protein expression: A control engineering approach.

Yadira Boada, Alejandro Vignoni, Jesús Picó
{yaboa, alvig2, jpico}@upv.es

Institut d'Automàtica i Informàtica Industrial, Universitat Politècnica de València,
Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España

Resumen

Controlling protein expression level is of interest in many applications. Yet, the stochastic nature of gene expression plays an important role and cannot be disregarded. We propose a gene synthetic circuit designed to control the mean gene expression in a population of cells and its variance. The circuit combines an intracellular negative feedback loop and quorum sensing based cell-to-cell communication system. Our *in silico* analysis using stochastic simulations reveals significant noise attenuation in gene expression through the interplay between quorum sensing and negative feedback, and explain their different roles for different noise sources. Preliminary *in vivo* results agree well with the computational results.

Palabras clave: cellular noise, noise attenuation, protein expression control, quorum sensing, feedback control.

1. Introduction

Noise is pervasive in the cellular mechanisms underlying gene expression [26]. It propagates to downstream genes at the single cell level, and eventually causes variation within an isogenic population [25, 19] that may determine the fate of individual cells and that of a whole population [8, 19].

At the gene level, noise can be traced back to intrinsic sources due to stochastic fluctuations in transcription and translation mechanisms, and extrinsic ones corresponding to gene independent fluctuations in protein expression due to external factors [8, 3, 14]. To minimize the deleterious effects of noise, cells have evolved different strategies at the single-cell level: from different transcription and translation efficiency so as to reduce translation burst rates in key genes [16] to more elaborated strategies, such as negative feedback regulation to reduce noise by shifting the noise spectrum to a higher frequency region [26]. Yet, cells live in communities, forming a population. At this

level, extracellular signaling propagates intracellular stochastic fluctuations across the population [34]. Thus, cells have adapted their communication mechanisms in order to improve the signal-to-noise ratio [40]. One of such communication mechanisms is quorum sensing.

Quorum sensing (QS), initially discovered in *V. fischeri* and *P. putida*, is a cell-to-cell communication mechanism whereby bacteria exchange chemical signaling molecules, called autoinducers, whose external concentration depends on the cell population density. It is known that synchronization and consensus protect from noise [33]. Cells detect a threshold concentration of QS autoinducers and alter gene expression accordingly [10], driving the population as a whole to achieve a desired consensus gene expression level despite the individual noise of each member of the population. Cells consensus induced by QS is thought to reduce extrinsic noise by reducing the transmission of fluctuating signals in the low-frequency domain [35], enhances intrinsic stochastic fluctuations [34], and allows entrainment of a noisy population when faced to environmental changing signals [22]. Therefore QS seems an effective tool to control the phenotypic variability in a population of cells [40].

Phenotypic variability has important practical relevance in many applications in the areas of biomedicine, biotechnology and other branches of biological science [11] as the presence of heterogeneous subpopulations may have significant impact on the yield and productivity of industrial cultures [21, 9, 2]. Thus, improving homogeneity of protein expression in industrial cultures is a goal of economic relevance for microbial cell factory processes. that has traditionally been attempted either by optimizing environmental conditions in the culture or by careful selection of the strain. Open loop strategies based on sensitivity analysis have been used to provide guides as to how properly tune transcriptional and translational parameters so that the noise levels can be controlled while the mean values can be simultaneously adjusted to desired values [18]. While sensitivity analysis gives very valuable insights, open loop control is

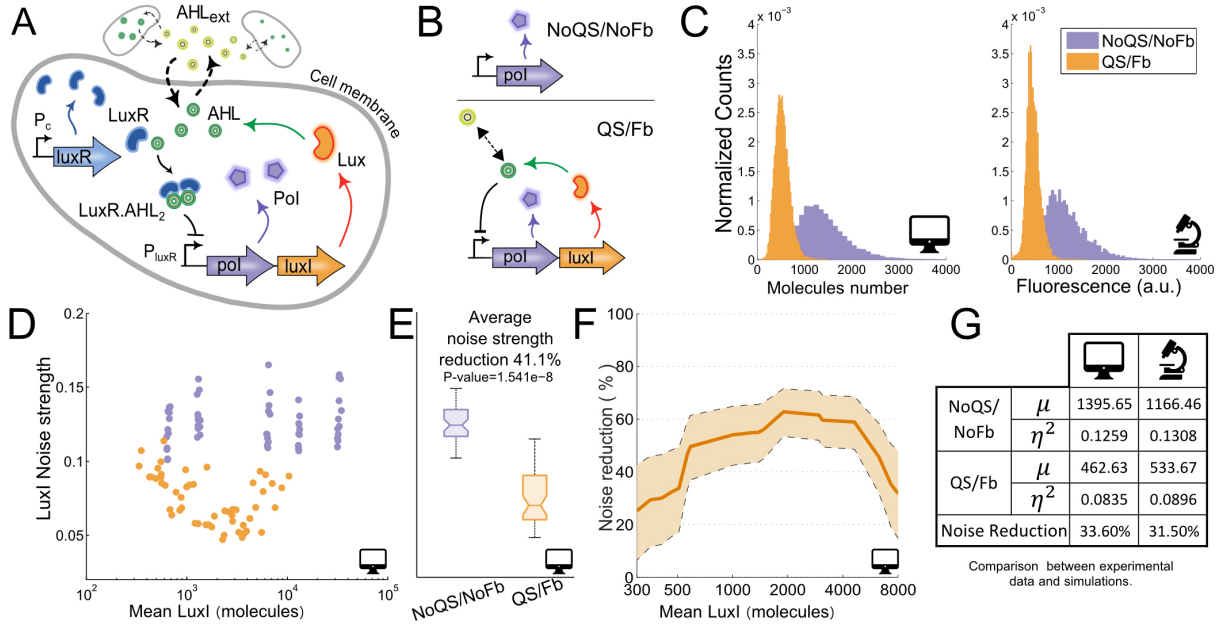


Figura 1: LuxI noise strength under presence/absence of quorum sensing and negative feedback. (A). Proposed synthetic gene circuit. (B) Circuits topologies: NoQS/NoFb (top) and QS/Fb (bottom). (C) Representative computational (left) and experimental (right) population histograms of LuxI noise strength for QS/Fb (orange) presenting a narrower gaussian-like distribution as compared to the Poisson-like one of NoQS/NoFb (purple). From computational simulations: (D) Sampled combinations of LuxI expression parameters for fixed LuxR ones show larger values of LuxI noise strength *vs.* mean for NoQS/NoFb (purple dots) than for QS/Fb (orange dots). (E) The QS/Fb circuit significantly reduces the average noise strength for the sampled parameters space by 41 %, from $\langle \eta^2_{\text{NoQS/NoFb}} \rangle = 0.1263$ down to $\langle \eta^2_{\text{QS/Fb}} \rangle = 0.0744$. (F) For varying LuxI parameters the average reduction of noise strength in LuxI ranges from 30 % up to 60 % and shows dependence on the mean expression level. Data shown for LuxI means between the biotechnological relevant range [300, 8000] molecules/cell. (G) Comparison of experimental and computational statistical moments.

not robust against system uncertainty and/or variations. There is an ever-growing appreciation that biological complexity requires new bioprocess design principles.

Synthetic biology, sometimes defined as the engineering of biology, has the potential to engineer genetic circuits to perform new functions for useful purposes in a systematic, predictable, robust, and efficient way [38]. In the last years, several synthetic circuits have been proposed with the ultimate goal of dealing with gene expression noise [43, 44]. Though circuits using negative feedback have been proved to decrease gene expression noise [5], single-cell intracellular feedback loops do not take into account that in practice one is interested in controlling gene expression mean value and noise across a population of cells. Feedback across a population of cells can be implemented by means of quorum sensing-based strategies, and has been shown to reduce noise effects [35, 39, 40]. Indeed, cell-to-cell communication by means of quorum sensing induces consensus among cells [27], that is, contributes to reduce the difference of internal state among cells in a population. This, in turn, may contribute to protect from noise [33]. Thus,

the idea of joining both intracellular negative feedback and extracellular feedback via quorum sensing is a natural one, that has been suggested in [1, 37, 42].

In this work we analyze the synthetic gene circuit designed previously in [1] depicted in Fig 1A, designed to reduce gene expression noise while achieving a desired mean expression level in a protein of interest [37]. The circuit uses the repressible promoter P_{lux} designed in [7] to implement a negative feedback loop over the gene of interest, and adds a QS mechanism based on N-acyl-L-homoserine lactone (AHL) [31, 10] to induce population consensus (Section 2). We used the stochastic Chemical Langevin Equation [13] to explore the impact of some key circuit parameters on noise strength (Section 3). To assess the role played by feedback and QS we compared the proposed circuit, denoted as QS/Fb, with constitutive expression (NoQS/NoFb) (Fig. 1B). Extrinsic noise was modeled by randomizing values of the model parameters [15, 36]. Our *in silico* analysis (Section 4) reveals significant noise attenuation in gene expression through the interplay between quorum sensing and negative feedback, and explain their

different roles for different noise sources, highlighting the need for proper characterization of extrinsic noise. Preliminary *in vivo* (Section 5) results agree with the computational ones.

2. Circuit description

The synthetic gene circuit (Fig. 1A) combines two functional subsystems already implemented in *E. coli*. The first subsystem implements a cell-to-cell communication mechanism via quorum sensing, based on exchange of the small signaling autoinducer molecule N-acyl-L-homoserine lactone (AHL) [17, 10]. This autoinducer molecule passively diffuses across the cellular membrane to and from the external environment. Intracellular AHL is synthesized by the protein LuxI expressed by an homolog of the gene *luxI* of *V. fischeri* [31]. The second subsystem uses the synthetic repressible promoter P_{lux} designed in [7] to control transcription of the gene *luxI*. This promoter is repressed by the transcription factor $(LuxR.AHL)_2$. Protein LuxR is expressed by gene *luxR* under the constitutive promoter P_c . Proteins LuxR and AHL bind creating the heterodimer $(LuxR.AHL)$, which subsequently dimerizes forming the heterotetramer $(LuxR.AHL)_2$. This way, the negative feedback control of the LuxI expression is effectively implemented.

3. Mathematical model

To analyze how our genetic circuit affects intrinsic and extrinsic noise, we needed an appropriate model and a computationally efficient method. Both aspects are intertwined. We considered an equivalent set of pseudo-reactions resulting from the deterministic model of the circuit, and then derived a stochastic model for a population of N cells whose mean corresponds to that of the deterministic one. We used the Chemical Langevin Equation approach (CLE). Though computationally much more efficient than the Chemical master equation (CME) or even the Gillespie algorithm, the CLE is still computationally demanding when the goal is to simulate a whole population of cells. Since the CLE approximates the CME by a system of stochastic differential equations of order equal to the number of species, a reduced deterministic model with as few species per cell as possible was desirable.

3.1. Reduced deterministic model

We aimed at obtaining a reduced model more amenable for computational analysis, but avoiding excessive reduction that would lead to lack

of biological relevance. In particular, the species we obtained in the reduced model are not lumped ones. Reduced models accounting for total mRNA and total transcription factor have been proposed to match modeled species with measurable ones [12]. In our case we explicitly modeled bound and unbound forms of the transcription factor, but the model accounts for the total LuxI protein. For our circuit this is a good proxy for the amount of protein of interest if both are co-expressed, and transcriptional noise dominates.

Thus, in a first step we used the mass-action kinetics formalism [4] to get a deterministic model of the full reactions network corresponding to the genetic circuit [1]. We then got a reduced order model by applying the *Quasi Steady-State Approximation* (QSSA) on the fast chemical reactions and taking into account invariant moieties [1, 20, 24]. The resulting deterministic reduced model is described by equations (1)-(2).

$$\begin{aligned}
 \dot{n}_1^i &= \frac{C_{IPI}}{dm_1} \left(\frac{k_{dLux} + \alpha n_3^i}{k_{dLux} + n_3^i} \right) - d_1 n_1^i \\
 \dot{n}_2^i &= \frac{C_{RPR}}{dm_R} + k_{-1} n_6^i - \left(\frac{k_{-1}}{k_{d1}} n_4^i + d_R \right) n_2^i \\
 \dot{n}_3^i &= \frac{k_{-2}}{k_{d2}} (n_6^i)^2 - (k_{-2} + d_{RA2}) n_3^i \\
 \dot{n}_4^i &= k_{-1} n_6^i + k_A n_1^i + D (V_c n_5 - n_4^i) - \left(\frac{k_{-1}}{k_{d1}} n_2^i + d_A \right) n_4^i \\
 \dot{n}_5 &= D \left(-NV_c n_5 + \sum_{i=1}^N n_4^i \right) - d_A n_5
 \end{aligned} \tag{1}$$

with:

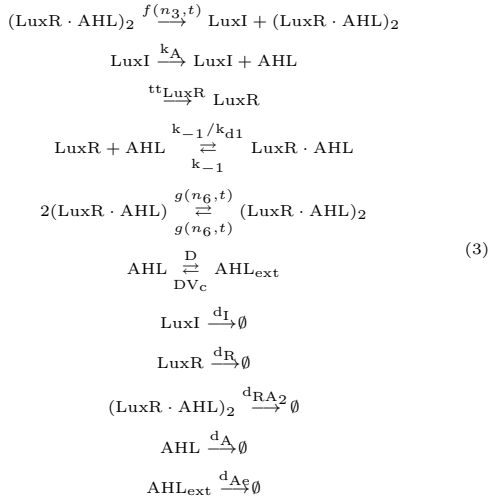
$$n_6^i = \frac{k_{d2}(d_{RA} + k_{-1})}{4k_2} \left[\sqrt{\frac{8k_{-2}(2k_{-2}k_{d1}n_3^i + k_{-1}n_2^in_4^i)}{k_{d1}k_{d2}(d_{RA} + k_{-1})^2}} + 1 - 1 \right] \tag{2}$$

where $\mathbf{n}(t)^i = [n_1(t)^i, n_2(t)^i, n_3(t)^i, n_4(t)^i, n_6(t)^i]^T$ is the vector of species LuxI, LuxR, $(LuxR.AHL)_2$, intracellular AHL and $(LuxR.AHL)$ for the i^{th} cell respectively, and n_5 is the extracellular AHL_{ext} .

3.2. Stochastic model

To model gene expression intrinsic noise we derived a stochastic CLE-based model whose mean corresponds to that of the deterministic reduced model (1)-(2). To this end we first considered the equivalent set of pseudo-reactions (3) for the de-

terministic model in the i^{th} cell.



where we denoted $f(n_3, t) \triangleq \frac{C_{\text{IPI}}}{d_{\text{mI}}} \left(\frac{k_{d\text{lux}} + \alpha_I n_3^i}{k_{d\text{lux}} + n_3^i} \right)$ as the Hill-like function associated to LuxI expression, $g(n_6, t)$ corresponds to the dimerization reflected in equation (2), and $\text{tt}_{\text{LuxR}} = \frac{C_{\text{RPR}}}{d_{\text{mR}}}$ represent the transcription-translation activity of *luxI* and *luxR* respectively, $V_c = \frac{V_{\text{cell}}}{V_{\text{ext}}}$ is the ratio between the cell volume and the culture medium volume, and \emptyset denotes species degradation.

For the computational analysis we used the Euler-Maruyama discretization (4) of the stochastic model resulting from the set of pseudo-reactions (3) :

$$\mathbf{n}(t+\delta t) = \mathbf{n}(t) + \mathbf{S} \cdot \mathbf{a}(\mathbf{n}) \delta t + \mathbf{S} \cdot \mathcal{N} \cdot \sqrt{\mathbf{a}(\mathbf{n})} \sqrt{\delta t}, \tag{4}$$

where $\mathbf{n}(t) = [\mathbf{n}(t)^1, \dots, \mathbf{n}(t)^N, n_5]^T$ are the number of molecules of each species in the population. The stoichiometry matrix \mathbf{S} , whose elements are the stoichiometry submatrices for each cell \mathbf{S}_{cell} and the external stoichiometry \mathbf{S}_{ext} , has structure:

$$\mathbf{S} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{S}_{\text{cell}} \otimes \mathbf{I}_N & \mathbf{0}_{N \times 1} \\ \hline \mathbf{S}_{\text{ext}} \otimes \mathbf{1}_{1 \times N} & -1 \end{array} \right], \tag{5}$$

where \otimes is the Kronecker product, \mathbf{I}_N the identity matrix of dimension $N \times N$, $\mathbf{0}_{N \times 1}$ and $\mathbf{1}_{1 \times N}$ are vectors of zeroes and ones respectively, and the coefficients in the stoichiometry matrices \mathbf{S}_{cell} and \mathbf{S}_{ext} , obtained from the set of pseudo-reactions (3), are:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{S}_{\text{cell}} &= \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{S}_{\text{ext}} &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ -1].
 \end{aligned}$$

The term $\mathbf{a}(\mathbf{n})$ in (4) is the associated vector of reaction propensities for the whole population of

cells, with:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{a}(\mathbf{n}) &= \left[\begin{array}{cccc|c} \mathbf{a}(\mathbf{n})^1 & \mathbf{a}(\mathbf{n})^2 & \dots & \mathbf{a}(\mathbf{n})^N & d_{A_e} n_5 \end{array} \right]^T \\
 \mathbf{a}(\mathbf{n})^i &= \left[\begin{array}{cccccc} f(n_3, t) & d_I n_1^i & \frac{C_{\text{RPR}}}{d_{\text{mR}}} & k_{-1} n_6^i & \frac{k_{-1}}{k_{d1}} n_2^i n_4^i & \\ d_R n_2^i & \frac{k_{-2}}{k_{d2}} (n_6^i)^2 & k_{-2} n_3^i & d_{RA2} n_3^i & k_A n_1^i & \\ d_A n_4^i & D n_4^i & D V_c n_5 & & & \end{array} \right]^T
 \end{aligned}$$

Finally, $\mathcal{N}_{(JN+1) \times (JN+1)}$, where $J = 13$ is the number of reactions for the i^{th} cell, is a diagonal matrix of continuous normal random variables with zero mean and unit variance.

Notice we used lumped propensity functions derived from the reduced model, like the $f(n_3)$ Hill-like function associated to LuxI repression. This approach has already been used in [41]. We validated it for our model by simulating the pseudo-reaction associated to $f(n_3^i)$ using CLE, and comparing the result with that obtained by simulating the set of corresponding original reactions using Gillespie's direct method SSA [1].

Extrinsic noise was modeled by randomizing the values of the model parameters [15, 36], an approach that can easily be integrated within the CLE framework. We assumed a normal distribution to generate the model parameters of the i^{th} cell in the population.

The stochastic simulations we performed for 400 min using $\delta t = 25 \cdot 10^{-4}$ sec.

4. Computational analysis

We used the stochastic model (4) of the proposed circuit, hereafter denoted as circuit QS/Fb, to explore the impact of some key circuit parameters on noise. As control circuit to compare with, we considered a second circuit which removes both QS and the feedback loop, denoted as NoQS/NoFb. For the computational analysis, this accounts to setting the synthesis of AHL to zero ($k_A = 0 \text{ min}^{-1}$) in model (4). This condition is achieved in the lab experimental implementation by taking out the gene coding for LuxI (Section 5).

Gene expression noise was evaluated using the squared coefficient of variation, i.e. the noise strength measure ($\eta^2 = (\sigma/\mu)^2$). This measure properly captures the contributions of both intrinsic and extrinsic noise [23], and allows comparisons for different expression rates.

We followed the following general procedure. First, for different combinations of the model parameters, we performed temporal simulations of the number of molecules of each species in the circuit for every cell in the population of our sys-

tem. Extrinsic noise was modeled by randomizing the values of the model parameters using a normal distribution with a variance of 15%. The models were implemented using OpenFPM (<http://openfpm.mpi-cbg.de>), a C++ version of the Parallel Particle Mesh (PPM) library allowing efficient computational particle-mesh simulations [30]. The code is available in (<http://sb2c1.ai2.upv.es/content/software>). In all simulations we used a population of $N = 240$ cells in a culture volume of $10^{-3} \mu\text{l}$, corresponding to an optical cell density $\text{OD}_{600} = 0.3$.

Then, we obtained the first two statistical moments μ and σ^2 for each species in the cell population at every time t_k . We used the laws of total expectation and total variance. From these moments, we calculated long-term distributions to infer the noise strength of each species.

Finally, we explored the effect of variations in parameters associated to expression of LuxI and LuxR, as they are as key parameters in our circuit. For LuxI, we considered the dissociation constant k_{dLux} between the transcription factor $(\text{LuxR} \cdot \text{AHL})_2$ and the repressible P_{lux} promoter, the translation rate p_I , and the basal expression α_I of the P_{lux} promoter. We sampled in the ranges $k_{\text{dLux}} = [10 - 2000]$ molecules, $\alpha = [0.01 - 0.1]$, and $p_I = [0.2 - 10] \text{ min}^{-1}$ selected from the literature [28, 6, 32] and experimentally achievable in the lab. As for LuxR, we considered two values for the the translation rate p_R : a strong RBS ($p_R = 10 \text{ min}^{-1}$), and a medium-weak one ($p_R = 2 \text{ min}^{-1}$).

5. Strains, plasmids and experimental protocol

To validate the *in silico* computational results, we implemented the QS/Fb and NoQS/NoFb circuits *in vivo*. We used components from the iGEM Registry of Standard Biological Parts. All parts were cloned using the Biobrick's foundation 3 Antibiotic Assembly method. All coding sequences have the double-terminator BBA_B0015, and were confirmed by sequencing. The circuit QS/Fb couples both QS-based cell-to-cell communication and the negative feedback subsystems. It was split in two subunits integrated in different plasmids.

On the one hand, plasmid pCB2tc contains the gene *luxR* (part BBA_C0062) coding for the protein LuxR constitutively expressed under the control of a medium strength promoter (part BBA_J23106), and a strong RBS (part BBA_B0034).

This insert was cloned into the pACYC184 plasmid cloning vector (p15A origin, 10-12 copies/cell, chloramphenicol/tetracycline [29]).

On the other hand, plasmid pYB06ta contains gene *luxI* (part BBA_C0161) under control of the P_{luxR} repressible promoter (part BBA_R0062) and a strong RBS (part BBA_B0034). The strong RBS BBA_B0034 and the green fluorescent protein (GFP, part BBA_E0040) were inserted using GIBSON assembly (NEB Catalog Number E2611S) upstream of *luxI*, right after the P_{luxR} promoter. This way, GFP, used as protein of interest (PoI in Fig. 1A) is co-expressed with LuxI.

They were inserted into the pBR322 plasmid cloning vector (pMB1 origin, 15-20 copies/cell, ampicillin/tetracycline [29]). Finally, both plasmids pCB2tc and pYB06ta were co-transformed in competent cells (DH-5 α , Invitrogen). Notice being both plasmids low copy ones, they do not introduce a big metabolic burden on the cell. On the other hand, their variability is quite narrow so gene copy number will not be the only relevant extrinsic noise source in the experimental setup.

As control network, we implemented the circuit NoQS/NoFb which removes both QS and the feedback loop. To this end, the plasmid pCB2tc above was co-transformed with the plasmid pAV02ta (pMB1 origin, ampicillin/tetracycline) containing only GFP downstream of the P_{luxR} repressible promoter (part BBA_R0062) and the the strong RBS (part BBA_B0034). Both were cloned in the pBR322 plasmid cloning vector.

5.1. Experimental protocol

For the experimental validation of the circuit (protocol details are in [1]), two sets of *E. coli* cells (cloning strain DH-5 α) carrying the QS/Fb and NoQS/NoFb circuits respectively, were inoculated from -80°C stocks into 3 mL of LB with appropriate antibiotics, followed by an overnight incubation at 37 °C and 250 rpm in 14 ml culture tubes. When the cultures reached an optical density (OD) of 4 (600 nm, Eppendorf BioPhotometer D30), the overnight cultures were diluted 500-fold (OD_{600} of 0.02) into M9 medium with appropriate antibiotics. These were used to inoculate new cultures, which were incubated for 7 hours (37°C, 250 rpm, 14 ml culture tubes) until they reached an OD_{600} between 0.2–0.3. At this point, cell growth and protein expression were interrupted by transferring the culture into an ice-water bath for 10 min. Next, 50 μL of each tube were transferred into 1 ml of phosphate-buffered saline with 500 $\mu\text{g}/\text{mL}$ of the transcription inhibitor rifampicin (PBS + Rif) in one 5 mL cytometer tube, and incubated during 1 hour in a water bath at 37°C, so that transcription kept blocked and GFP had time to mature and fold properly. Samples were measured at different time points using the BD

FACSCalibur flow cytometer (original default configuration parameters), and flow cytometry data analyzed with custom scripts.

6. Results

We first addressed the question whether the proposed QS/Fb circuit effectively reduces noise strength with respect to the circuit NoQS/NoFb (Fig. 1B). The last one consists of the LuxR expression on the one hand, and the protein of interest (PoI) downstream the P_{lux} repressible promoter, without the luxI gene coding for LuxI protein, on the other. Since no autoinducer *AHL* is neither produced nor externally introduced, there is no repression, so the expression of PoI is essentially a constitutive one (Section 2). This corresponds to the Poisson distribution observed in the purple population histogram in the left panel of Fig. 1C. Contrarily, the QS/Fb histogram departs from the Poisson distribution to become a narrow Gaussian-like one in the orange population histogram in the left panel of Fig. 1C. This fact, and the reduction in the mean expression value, indicate the strong presence of regulation. In both cases we used the nominal circuit parameters [1].

Reduction in noise strength was not due to a particular choice of the circuit parameter values, but a property of the proposed topology. Fig. 1D depicts LuxI noise strength *vs.* mean expression for 60 different combinations of the P_{luxR} characteristics for both QS/Fb (orange points) and NoQS/NoFb (purple points). The points in the figure correspond to the mean values across the cells population for each combination of parameters (Section 4). The magnitude of noise strength reduction was larger for medium values of mean protein expression. Noise strength levels were similar for all mean expression values in the case of the NoQS/NoFb circuit. Mean expression values in this case depend only on the translation rate p_I for which five discrete values were used, inducing the five mean values seen in the figure. On the contrary, the QS/Fb circuit showed lower values of noise strength and more graded values of the mean expression level, as it depends on the combination of all three parameters varied.

More important, noise strength was consistently lower for the QS/Fb circuit. Taking together all the different combinations of promoter parameters for each circuit, and the average noise strength was significantly reduced by 41 % in the presence of quorum sensing and negative feedback as shown in Fig. 1E.

For the given fixed LuxR expression parameters, the noise strength reduction in LuxI showed a

clear dependence on its mean expression level. In Fig. 1F the minimum and maximum values of LuxI noise reduction are plotted as a function of its mean value. In the range between 600 and 6000 LuxI molecules it was possible to reduce the noise variance at least in 35 % in the worst case scenario, with a maximum reduction of around 70 % for means between 2000 and 3000 molecules.

7. Conclusion

Our results show that gene synthetic circuits benefiting from the interplay between feedback and cell-to-cell communication allow control of the mean expression level and noise strength of a protein of interest. A few circuit parameters easy to tune in the wet-lab can be used to achieve noise strength reductions up to a 60 % with respect to constitutive expression of the protein of interest.

Mean expression level and noise strength are not independent goals. At low mean values intrinsic noise dominates and sets the minimum noise strength attainable. At high mean values extrinsic noise dominates. Thus, there is a trade-off between expression level and noise strength, as revealed both by system-wide experimental data and theoretical analysis reported in the literature. Our computational results fitted well in this scenario, and suggest that tuning synthetic gene circuits to minimize noise while achieving a desired expression level will require a multi-objective optimization approach.

The experimental results, though preliminary, showed a high concordance the computational ones and confirmed the capability of the proposed circuit to reduce noise strength.

Agradecimientos

This work was partially supported by the Spanish Government (CICYT DPI2014-55276-C5-1) and the European Union (FEDER). Y.B. thanks grant FPI/2013-3242 of UPV.

Referencias

- [1] Yadira Boada, Alejandro Vignoni, and Jesus Pico. Engineered control of genetic variability reveals interplay between quorum sensing, feedback regulation and biochemical noise. *ACS Synthetic Biology*, 0(Just Accepted):null, 0.
- [2] M. Carlquist, R. L. Fernandes, S. Helmark, Anna-Lena L. Heins, L. Lundin, S. J. Sorensen, K.V. Gernaey, and A. E. Lantz. Physiological heterogeneities in microbial populations and implications for physical

- stress tolerance. *Microb Cell Fact*, 11:94, 2012.
- [3] Guilhem Chalancon, Charles N. J. Ravarani, S. Balaji, Alfonso Martinez-Arias, L. Aravind, Raja Jothi, and M. Madan Babu. Interplay between gene expression noise and regulatory network architecture. *Trends Genet*, 28(5):221–32, 5 2012.
 - [4] Vijaysekhar Chellaboina, Sanjay Bhat, Wasim Haddad, and Dennis Bernstein. Modeling and analysis of mass-action kinetics. *IEEE Control Systems Magazine*, 29(4):60–78, 8 2009.
 - [5] Yann Dublanche, Konstantinos Michalodimitrakis, Nico Kümmerer, Mathilde Foglierini, and Luis Serrano. Noise in transcription negative feedback loops: simulation and experimental analysis. *Mol Syst Biol*, 2:41, 2006.
 - [6] Robert G Egbert and Eric Klavins. Fine-tuning gene networks using simple sequence repeats. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012.
 - [7] K. A. Eglund and E. P. Greenberg. Conversion of the vibrio fischeri transcriptional activator, luxr, to a repressor. *Journal of Bacteriology*, 182(3):805–811, 2000.
 - [8] Avigdor Eldar and Michael B. Elowitz. Functional roles for noise in genetic circuits. *Nature*, 467(7312):167–173, 2010.
 - [9] R. Lencastre Fernandes, M. Nierychlo, L. Lundin, A. E. Pedersen, P. E. Puentes Tellez, A. Dutta, M. Carlquist, A. Bolic, D. Schäpper, A. C. Brunetti, S. Helmark, A-L L. Heins, A. D. Jensen, I. Nopens, K. Rottwitt, N. Szita, J. D. van Elsas, P. H. Nielsen, J. Martinussen, S. J. Sorensen, A. E. Lantz, and K. V. Gernaey. Experimental methods and modeling techniques for description of cell population heterogeneity. *Biotechnol Adv*, 29(6):575–99, 2011.
 - [10] C. Fuqua, M.R. Parsek, and E.P. Greenberg. Regulation of gene expression by cell-to-cell communication: acyl-homoserine lactone quorum sensing. *Annual review of genetics*, 35(1):439–468, 2001.
 - [11] K. A. Geiler-Samerotte, C. R. Bauer, S. Li, N. Ziv, D. Gresham, and M. L. Siegal. The details in the distributions: why and how to study phenotypic variability. *Curr Opin Biotechnol*, 24(4):752–9, 8 2013.
 - [12] Edward J. Hancock, Guy-Bart B. Stan, James A. J. Arpino, and Antonis Papachristodoulou. Simplified mechanistic models of gene regulation for analysis and design. *J R Soc Interface*, 12(108):20150312, 7 2015.
 - [13] Desmond J. Higham. Modeling and simulating chemical reactions. *SIAM Review*, 50(2):347–368, 2008.
 - [14] Daniel L. Jones, Robert C. Brewster, and Rob Phillips. Promoter architecture dictates cell-to-cell variability in gene expression. *Science*, 346(6216):1533–6, 12 2014.
 - [15] Jaewook Joo, Steven J. Plimpton, and Jean-Loup L. Faulon. Statistical ensemble analysis for simulating extrinsic noise-driven response in nf- κ b signaling networks. *BMC Syst Biol*, 7:45, 2013.
 - [16] Mads Kærn, Timothy C. Elston, William J. Blake, and James J. Collins. Stochasticity in gene expression: from theories to phenotypes. *Nat Rev Genet*, 6(6):451–64, 2005.
 - [17] H. B. Kaplan and E. P. Greenberg. Diffusion of autoinducer is involved in regulation of the vibrio fischeri luminescence system. *Journal of bacteriology*, 163(3):1210–1214, 1985.
 - [18] Kyung H. Kim and Herbert M. Sauro. Adjusting phenotypes by noise control. *PLoS Comput Biol*, 8(1):e1002344, 2012.
 - [19] Piyush Labhsetwar, John Andrew Cole, Elijah Roberts, Nathan D. Price, and Zaida A. Luthey-Schulten. Heterogeneity in protein expression induces metabolic variability in a modeled escherichia coli population. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(34):14006–14011, 2013.
 - [20] Bence Mélykúti, João P. Hespanha, and Mustafa Khammash. Equilibrium distributions of simple biochemical reaction systems for time-scale separation in stochastic reaction networks. *J R Soc Interface*, 11(97):20140054, 8 2014.
 - [21] Susann Müller, Hauke Harms, and Thomas Bley. Origin and analysis of microbial population heterogeneity in bioprocesses. *Curr Opin Biotechnol*, 21(1):100–13, 2 2010.
 - [22] Edward M. Nelson, Volker Kurz, Nicolas Perry, Douglas Kyrouac, and Gregory Timp. Biological noise abatement: Coordinating the responses of autonomous bacteria in a synthetic biofilm to a fluctuating environment using a stochastic bistable switch. *ACS synthetic biology*, 3(5):286–297, 2013.

- [23] Johan Paulsson. Summing up the noise in gene networks. *Nature*, 427(6973):415–8, 1 2004.
- [24] Jesús Picó, Alejandro Vignoni, Enric Picó-Marco, and Yadira Boada. Modelling biochemical systems: from mass action kinetics to linear noise approximation. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 12(3):241–252, 7 2015.
- [25] Arjun Raj and Alexander van Oudenaarden. Nature, nurture, or chance: stochastic gene expression and its consequences. *Cell*, 135(2):216–226, 2008.
- [26] Jonathan M Raser and Erin K O’Shea. Noise in gene expression: origins, consequences, and control. *Science*, 309(5743):2010–2013, 2005.
- [27] Giovanni Russo and Jean Jacques E. Slotine. Global convergence of quorum-sensing networks. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*, 82(4 Pt 1):041919, 10 2010.
- [28] Howard M Salis, Ethan A Mirsky, and Christopher A Voigt. Automated design of synthetic ribosome binding sites to control protein expression. *Nature biotechnology*, 27(10):946–950, 2009.
- [29] Sambrook et al. *Molecular cloning: a laboratory manual*. Number Ed. 2. Cold spring harbor laboratory press, 1989.
- [30] I. F. Sbalzarini, J. H. Walther, M. Bergdorf, S. E. Hieber, E. M. Kotsalis, and P. Koumoutsakos. Ppm- a highly efficient parallel particle-mesh library for the simulation of continuum systems. *Journal of Computational Physics*, 215(2):566–588, 2006.
- [31] Amy L. Schaefer, Dale L. Val, Brian L. Hanzelka, J. E. Cronan, and E. P. Greenberg. Generation of cell-to-cell signals in quorum sensing: acyl homoserine lactone synthase activity of a purified vibrio fischeri luxI protein. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93(18):9505–9509, 1996.
- [32] Sebastian R. Schmidl, Ravi U. Sheth, Andrew Wu, and Jeffrey J. Tabor. Refactoring and optimization of light-switchable escherichia coli two-component systems. *ACS synthetic biology*, 3(11):820–831, 2014.
- [33] Nicolas Tabareau, Jean-Jacques J. Slotine, and Quang-Cuong C. Pham. How synchronization protects from noise. *PLoS Comput Biol*, 6(1):e1000637, 2010.
- [34] Omar P. Tabbaa, German Nudelman, Stuart C. Sealfon, Fernand Hayot, and Ciriyaam Jayaprakash. Noise propagation through extracellular signaling leads to fluctuations in gene expression. *BMC Syst Biol*, 7:94, 2013.
- [35] Yu Tanouchi, Dennis Tu, Jungsang Kim, and Lingchong You. Noise reduction by diffusional dissipation in a minimal quorum sensing motif. *PLoS Comput Biol*, 4(8):e1000167, 2008.
- [36] Tina Toni and Bruce Tidor. Combined model of intrinsic and extrinsic variability for computational network design with application to synthetic biology. *PLoS Comput Biol*, 9(3):e1002960, 2013.
- [37] A. Vignoni, D. A. Oyarzún, J. Picó, and G. B. Stan. Control of protein concentrations in heterogeneous cell populations. *Procs. 2013 European Control Conference (ECC)*, pages 3633–3639, 2013.
- [38] Jeffrey C. Way, James J. Collins, Jay D. Keasling, and Pamela A. Silver. Integrating biological redesign: where synthetic biology came from and where it needs to go. *Cell*, 157(1):151–61, 2014.
- [39] Marc Weber and Javier Buceta. Noise regulation by quorum sensing in low mrna copy number systems. *BMC Syst Biol*, 5:11, 2011.
- [40] Marc Weber and Javier Buceta. Dynamics of the quorum sensing switch: stochastic and non-stationary effects. *BMC Syst Biol*, 7:6, 2013.
- [41] Mae L. Woods, Miriam Leon, Ruben Perez-Carrasco, and Chris P. Barnes. A statistical approach reveals designs for the most robust stochastic gene oscillators. *ACS Synth Biol*, 2 2016.
- [42] Amin Zargar, David N. Quan, and William E. Bentley. Enhancing intercellular coordination: Rewiring quorum sensing networks for increased protein expression through autonomous induction. *ACS Synth Biol*, 5(9):923–8, 2016.
- [43] Christoph Zechner, Georg Seelig, Marc Rullan, and Mustafa Khammash. Molecular circuits for dynamic noise filtering. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, page 201517109, 4 2016.
- [44] Carolyn Zhang, Ryan Tsoi, and Lingchong You. Addressing biological uncertainties in engineering gene circuits. *Integrative Biology*, 8(4):456–464, 2016.

CONTROL ROBUSTO DEL PH EN FOTOBIORREACTORES MEDIANTE RECHAZO ACTIVO DE PERTURBACIONES

Carreño, J.J¹; Guzmán, J.L²; Moreno, J.C²; Villamizar, R¹

jose.carreno@correo.uis.edu.co, joguzman@ual.es, jcmoreno@ual.es, rovillam@uis.edu.co

¹Dep. de Ingenierías Eléctrica y Electrónica, Universidad Industrial de Santander, Colombia

²Departamento de Informática, Universidad de Almería, España

Resumen

En este trabajo se aborda el problema de la regulación del pH en fotobiorreactores usando el enfoque de control por rechazo activo de perturbaciones. Dicha formulación se basa en el diseño de observadores GPI para la estimación en línea de perturbaciones externas y dinámicas no modeladas empleando el concepto de planitud diferencial. Con el fin de validar el rendimiento del controlador propuesto, se utiliza un simulador de un fotobiorreactor tipo Raceway a escala. Los resultados de simulación demuestran que el algoritmo de control evaluado mejora significativamente la precisión de la regulación del pH, logrando con ello una influencia positiva en la producción de biomasa.

Palabras clave: Reactor Raceway; Planitud Diferencial; Rechazo Activo de Perturbaciones; Observadores GPI; Microalgas, Control Robusto.

1 INTRODUCCIÓN

El cultivo de microalgas se ha convertido en un proceso intensamente estudiado, ya que puede utilizarse en diferentes sistemas, como el tratamiento de aguas residuales, la mitigación de CO₂ o la producción de bioenergía [9] [5]. La razón principal de esto es la alta eficiencia fotosintética de las microalgas en comparación con las plantas terrestres. Además, el cultivo de microalgas puede ser manejado en condiciones muy adversas como los climas semiáridos, donde se puede cultivar en cualquier época del año. Otro factor importante que caracteriza el proceso de las microalgas es la elevada tasa de cultivo para la superficie utilizada en su crecimiento [11]. La biomasa resultante es viable en la producción de biocombustibles, compuestos farmacéuticos, alimentos para la salud, así como alimentos para animales o para peces.

Desde la década de los 50 los fotobiorreactores Raceway han sido intensamente desarrollados con el fin de proporcionar una solución a escala industrial para el cultivo de microalgas. Por su escalabilidad y viabilidad, actualmente se les con-

sidera la tecnología de producción más adecuada para el cultivo industrial de microalgas. La popularidad de los reactores de conducción proviene de su baja inversión inicial en comparación con otras tecnologías competidoras, como los fotobiorreactores tubulares, que requieren estructuras y equipos más complejos. Otras ventajas relevantes de este tipo de reactor son la simplicidad de operación y los bajos costos de mantenimiento [14]. Todas estas propiedades hacen posible que estos reactores produzcan biocombustibles a partir de biomasa de microalgas.

Por otra parte, el CO₂ tiene una influencia clave en la producción final de biomasa de microalgas, ya que el carbono corresponde aproximadamente a la mitad de dicha biomasa. Eso implica que la inyección de CO₂ tiene una repercusión directa sobre el valor del pH del cultivo de microalgas. Un buen diseño de control automático determinará tanto el instante de tiempo como la cantidad adecuada de CO₂ a inyectar para mantener el pH del cultivo de microalgas en un rango de valores óptimo [10].

En este trabajo se describe el diseño de un esquema de retroalimentación de la salida robusto, basado en un controlador y un observador (ambos lineales) para el control y rechazo activo de perturbaciones en un fotobiorreactor tipo Raceway. Este tipo de observadores, llamados observadores Proporcional Integral Generalizados (GPI, por sus siglas en inglés), permiten reconstruir los errores de posición, velocidad, la perturbación desconocida de entrada del proceso y un cierto número de sus derivadas en el tiempo.

El Control por Rechazo Activo de Perturbaciones (ADRC por las siglas en inglés de Active Disturbance Rejection Control) constituye una metodología madura en el control de sistemas inciertos tanto lineales como no lineales [13]. La idea principal consiste en la estimación precisa de la parte desconocida de la dinámica del sistema a controlar y suprimir su efecto mediante la complementación de la ley de control con un esfuerzo de cancelación [4].

Este artículo está organizado de la siguiente ma-

nera: En la sección 2 se describe el principio de funcionamiento del fotobiorreactor tipo Raceway y del modelo matemático que describe su dinámica. La sección 3 relaciona los conceptos de rechazo activo de perturbaciones en sistemas diferencialmente planos y el diseño de observadores GPI. Se presenta también el procedimiento de diseño de un controlador PI robusto de dos grados de libertad y de un observador de perturbaciones para la planta en cuestión. En la Sección 4 se muestran los resultados obtenidos en la validación del controlador y un análisis de dichos resultados. Finalmente la Sección 5 está dedicada a las conclusiones obtenidas con base a la validación del controlador.

2 FOTOBIORREACTOR RACEWAY

Las microalgas son microorganismos unicelulares presentes en todos los medios acuosos, y en muchas otras zonas ampliamente distribuidas por la biósfera. Su importancia se debe a su alta eficiencia para convertir la energía solar en biomasa, en sus elevadas tasas de producción y en su adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales [1]. Estos microorganismos son utilizados para la obtención de productos químicos, farmacéuticos, agroalimentarios, etc., pero aún más interesante es que su alto poder calorífico la convierte en un sustituto perfecto de los combustibles fósiles.

La elevada velocidad de crecimiento de las microalgas junto con el poco volumen que ocupan, en comparación con otros organismos fotosintéticos, hacen posible que en la actualidad el cultivo se realice en depósitos adaptados, denominados fotobiorreactores, en los que se procura que se den las condiciones necesarias para un crecimiento óptimo [7].

2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El reactor experimental está situado en la Estación Experimental Las Palmerillas propiedad de la Fundación CAJAMAR (Almería, España). El carril tiene una superficie total de 100 m^2 y está formado por dos canales de 50 m, cada uno de 1 m de ancho y conectados por curvas en forma de U (ver Figura 1). Este reactor opera a una profundidad constante de 0.2 m según lo recomendado por [9] para dar el mejor rendimiento hidráulico en términos generales de consumo de energía, proporcionando un volumen total de 20 m^3 [10].

La mezcla fue realizada por una rueda de paletas de 1.2 m de diámetro con 8 palas de contrachapado marino y accionada por un motor eléctrico (W12

35 kW, 1500 rpm, Ebarba, Barcelona, España) con reducción de engranajes (WEB Ibérica S.A., Barcelona, España). La velocidad de las paletas se controla con un convertidor de frecuencia (CFW 08 WEB Ibérica, S.A., Barcelona, España). Además, la carbonatación se realiza a través de un sumidero de 0,65 m de ancho y de 1 m de profundidad, que cubre toda la anchura del canal (1 m) y se encuentra a 1.8 m aguas abajo de la rueda de paletas. El gas de combustión se inyecta a través de tres difusores de membrana de placa en el fondo del sumidero (AFD 270, EcoTec, España). La canalización y el sumidero están hechos de fibra de vidrio blanca de 3 mm de espesor.

2.2 MODELO DINÁMICO

Para el diseño del controlador se utiliza un modelo lineal en el punto de operación. El pH del cultivo está influenciado principalmente por dos fenómenos: el suministro de CO_2 y absorción de este como función de la disponibilidad de luz. El CO_2 suministrado, a través de los gases de combustión, contribuye a la formación de ácido carbónico causando una disminución en el pH del cultivo. Además, las microalgas realizan fotosíntesis en presencia de radiación solar consumiendo CO_2 y produciendo O_2 , provocando así un aumento gradual del pH . Por otro lado, el aumento de la radiación solar produce variaciones en la tasa de fotosíntesis ocasionando con ello el aumento de la tasa del pH .

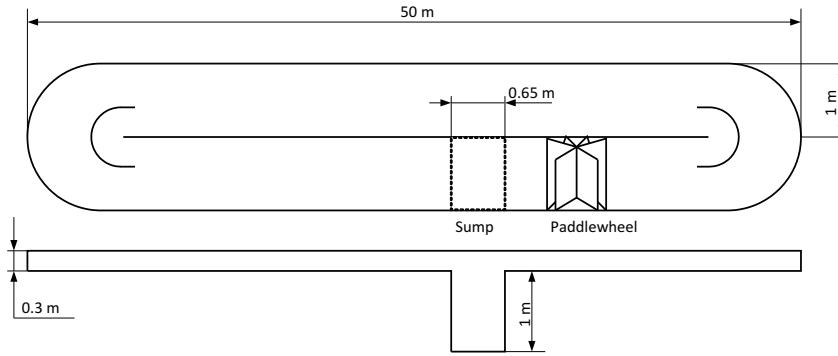
Considerando que la variable de control del proceso es el pH del cultivo, la apertura de la válvula de inyección de los gases de combustión es la variable manipulada y la irradiación solar es la principal perturbación del sistema, el comportamiento del proceso puede representarse mediante modelos lineales simplificados.

El modelo lineal que relaciona el nivel de pH con la irradiancia y la entrada de inyección de CO_2 alrededor de un punto de operación está representado por la siguiente expresión [10]:

$$pH(s) = \frac{k}{\tau_s + 1} e^{-\lambda s} u(s) + \frac{k_r}{\tau_r s + 1} e^{-\lambda_r s} I(s) \quad (1)$$

donde pH es el nivel de pH del cultivo, u es la cantidad de CO_2 inyectado o señal de control, e I es la irradiancia solar.

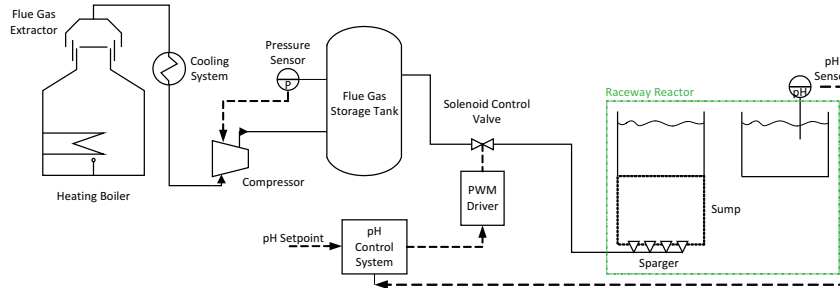
Debido a la representación de la dinámica de las entradas por medio de modelos de primer orden con retardo, se presentan errores de modelado. Sin embargo, esos errores no son un problema si se emplea una técnica de control robusta a perturbaciones externas e incertidumbre paramétrica en



(a) Vista superior y lateral del fotobiorreactor



(b) Instalaciones experimentales



(c) Sistema de control del pH

Figura 1: Fotoreactor Raceway

el modelo.

3 CONTROL DE SISTEMAS DIFERENCIALMENTE PLANOS

La planitud diferencial se deriva del enfoque diferencial algebraico y fue propuesta por Fliess y sus colaboradores (Levine, Martin, Rouchon) en 1995 [8]. Esta es una propiedad de algunos sistemas dinámicos controlados que permite trivializar la planificación de trayectorias sin resolver ecuaciones diferenciales mientras simplifica el problema del diseño del controlador de realimentación

a un conjunto de sistemas LTI desacoplados [12].

Considere el sistema dinámico n -dimensional, suave:

$$\dot{y}^{(n)} = \phi(t, y)u + \psi(t, y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}) \quad (2)$$

donde $\phi(t, y)$ es conocida, uniformemente acotada y alejada de cero, y la función $\psi(\cdot) = \psi(t, y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)})$ puede ser desconocida y es uniformemente acotada de manera absoluta al igual que todas y cada una de sus derivadas temporales hasta un orden finito m .

Para el seguimiento de una trayectoria conocida suave $y^*(t)$, $t \in [0, \infty)$ por medio de una ley de con-

trol realimentado u , se propone el siguiente controlador linealizante basado en observador:

$$u = \frac{1}{\phi(t, y)} \left[[y^*(t)]^{(n)} - \sum_{i=0}^{n-1} k_i \left(y_i - [y^*(t)]^i \right) - \hat{\psi} \right] \quad (3)$$

donde y_i , $i = 0, 1, \dots, n-1$, y , $\hat{\psi} = z_1$ son las variables generadas por el siguiente observador de Luenberger extendido, conocido también como observador GPI (Generalized-Proportional-Integral):

$$\begin{aligned} \dot{y}_0 &= y_1 + \lambda_{m+n-1}(y - y_0) \\ \dot{y}_j &= y_{j+1} + \lambda_{m+n-j-1}(y - y_0), \\ &\quad j = 1, \dots, n-2 \\ \dot{y}_{n-1} &= \phi(t, y)u + z_1 + \lambda_m(y - y_0) \\ \dot{z}_i &= z_{i+1} + \lambda_{m-1}(y - y_0), \quad i = 2, \dots, m-1 \\ \dot{z}_m &= \lambda_0(y - y_0) \end{aligned} \quad (4)$$

Los coeficientes k_j del controlador son seleccionados de tal forma que el siguiente polinomio en la variable compleja s , sea Hurwitz:

$$p_{cl}(s) = s^n + k_{n-1}s^{n-1} + \dots + k_1s + k_0 = 0 \quad (5)$$

De igual forma los coeficientes $\lambda_0, \dots, \lambda_{m+n-1}$ del observador se seleccionan de tal forma que el siguiente polinomio en la variable compleja s también sea Hurwitz:

$$p_{obs}(s) = s^n + \lambda_{n-1}s^{n-1} + \dots + \lambda_1s + \lambda_0 = 0 \quad (6)$$

3.1 CONTROL PI ROBUSTO DE DOS GRADOS DE LIBERAD

Considere el siguiente algoritmo de control de un PI de dos grados de libertad (2GDL):

$$u(s) = K_p \left[\beta r(s) - y(s) + \frac{r(s) - y(s)}{T_i s} \right] \quad (7)$$

Los parámetros del controlador a sintonizar son $\theta = \{K_p, T_i, \beta\}$.

Usando la ganancia del modelo del proceso, k , y la constante de tiempo, τ , así como la transformación $\hat{s} = \tau s$, la función de transferencia del pH con respecto a la variación del CO_2 de la ecuación 1 y la función de transferencia del PI de 2GDL de la ecuación 7 pueden ser expresados en una forma normalizada como sigue:

$$P(\hat{s}) = \frac{1}{\hat{s} + 1} e^{-\tau_L \hat{s}} \quad (8)$$

$$u(\hat{s}) = \hat{k}_p \left[\beta r(\hat{s}) - y(\hat{s}) + \frac{1}{\hat{\tau}_i \hat{s}} (r(\hat{s}) - y(\hat{s})) \right] \quad (9)$$

donde $\tau_L = \lambda/\tau$ es el retardo de tiempo del modelo normalizado y

$$K_p = \frac{\hat{k}_p}{k}, T_i = \hat{\tau}_i \tau \quad (10)$$

Una forma de expresar la robustez de un sistema es usando el margen de estabilidad S_m , que es la distancia más corta desde la curva de Nyquist hasta el punto crítico $(-1,0)$. Esta distancia es el recíproco del pico máximo de la función de sensibilidad, o Sensibilidad máxima, definida como sigue:

$$M_s = \max_{\omega} \left| \frac{1}{1 + K(j\omega)P(j\omega)} \right| \quad (11)$$

donde $K(j\omega)$ y $P(j\omega)$ son las respuestas en frecuencia del controlador y de la planta, respectivamente.

Valores bajos de M_s implican sistemas de lazo cerrado con una función de transferencia que está lejos del punto crítico, y por lo tanto sistemas más robustos. En [3] se proponen las siguientes expresiones para calcular los parámetros de un PI robusto de dos grados de libertad para un sistema de primer orden:

$$\hat{k}_p = \frac{a_0 + a_1 \tau_L}{a_2 + a_3 \tau_L + a_4 \tau_L^2 + a_5 \tau_L^3} \quad (12)$$

$$\hat{\tau}_i = \frac{b_0 + b_1 \tau_L}{b_2 + b_3 \tau_L + b_4 \tau_L^2 + b_5 \tau_L^3 + b_6 \tau_L^4} \quad (13)$$

$$\beta = c_0 + c_1 \tau_L + c_2 \tau_L^2 + c_3 \tau_L^3 \quad (14)$$

Los coeficientes a_i, b_j y c_k se calculan en función del pico máximo de sensibilidad deseado solucionando un problema de optimización para minimizar un funcional de costo en términos del seguimiento y regulación deseados [2].

3.2 DISEÑO DE OBSERVADOR GPI PARA FOTOBIOREACTOR

Debido a que el retardo es muy pequeño comparado con la constante de tiempo del sistema, la dinámica del reactor Raceway descrita en la ecuación (1) puede ser aproximada a la siguiente ecuación de primer orden perturbada:

$$\dot{y} = \frac{k}{\tau} u(t) + \xi(t) \quad (15)$$

Para estimar la perturbación se propone el siguiente observador GPI:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{y}} &= \frac{k}{\tau} u(t) + z_1 + \lambda_3(y - \hat{y}) \\ \dot{z}_1 &= z_2 + \lambda_2(y - \hat{y}) \\ \dot{z}_2 &= z_3 + \lambda_1(y - \hat{y}) \\ \dot{z}_3 &= \lambda_0(y - \hat{y}) \end{aligned} \quad (16)$$

donde $z_1 = \hat{\xi}(t)$, es la estimación de la perturbación externa, que hace referencia al efecto conjunto de la radiación y las dinámicas no modeladas.

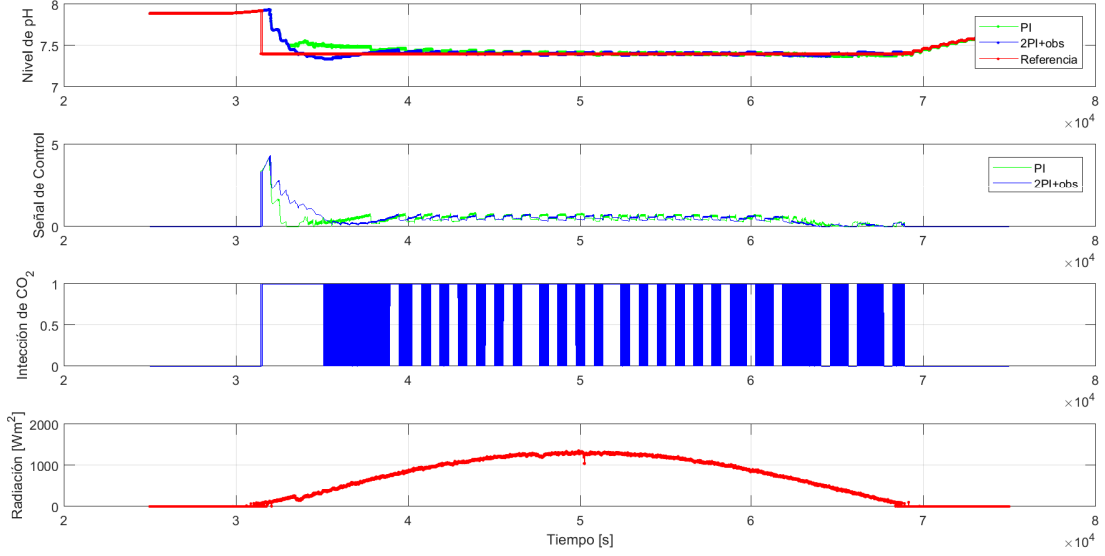


Figura 2: Validación del controlador para el día 23/10/2014

Con la selección de los coeficientes λ_i se logra obtener el siguiente polinomio característico del error de estimación:

$$p_{obs}(s) = s^4 + \lambda_3 s^3 + \lambda_2 s^2 + \lambda_1 s + \lambda_0 = 0 \quad (17)$$

Los parámetros $\lambda_0 \dots \lambda_3$ de la ecuación 17 se pueden calcular con base en la siguiente ecuación característica del error de estimación deseada:

$$p_{obs}(s) = (s^2 + 2\zeta_o \omega_{no} s + \omega_{no}^2)^2 = 0 \quad (18)$$

Con lo cual se pueden calcular los coeficientes del observador de la siguiente manera:

$$\lambda_3 = 4\zeta_o \omega_{no}, \quad \lambda_2 = 2\omega_{no}^2(1 + \zeta_o^2)$$

$$\lambda_1 = 4\zeta_o \omega_{no}^3, \quad \lambda_0 = \omega_{no}^4$$

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para validar el desempeño del esquema de control propuesto se empleó el simulador descrito en [6]. Los valores de irradiación empleados en la simulación corresponden a mediciones tomadas en la estación experimental Las Palmerillas durante un día soleado y un día nublado.

Los parámetros obtenidos alrededor del punto de operación del reactor de la ecuación 1 son: $k = 1.3554 \text{ pH}\%^{-1}$, $\tau = 58 \text{ min}$, $\lambda = 2.33 \text{ min}$, $k_r = 4 \cdot 10^{-4} \text{ pHm}^2 \text{W}^{-1}$, $\tau_r = 91 \text{ min}$ y $\lambda_r = 1.5 \text{ min}$.

Con el fin de obtener un margen de fase superior a 41.85° y un margen de ganancia mínimo de 1.71dB (esto es una robustez de $M_s = 1.4$), las constantes

Tabla 1: Constantes de sintonización robusta

j	a_j	b_j	c_j
0	0.7253	-0.1606	0.5049
1	0.6505	47.67	0.8330
2	0.0023	4.166	-0.1034
3	2.143	30.23	0
4	1	7.973	- - -
5	0	-4.738	- - -
6	- - -	1	- - -

de las ecuaciones 12, 13 y 14 deben seleccionarse como aparecen en la Tabla 1 [3].

Combinando las ecuaciones 10, 12, 13 y 14 se obtienen los parámetros del controlador robusto de dos grados de libertad:

$$K_p = -6.144; \quad T_i = 1133.36; \quad \beta = 0.5383$$

Además, para garantizar una rápida y buena estimación se puede emplear $\omega_{no} = 50$ y $\zeta_o = 2$ para el observador de perturbaciones.

El esquema de control propuesto, que combina el enfoque de rechazo activo de perturbaciones con el control PI robusto de dos grados de libertad se muestra en la Figura 4. La ley de control estaría definida por la siguiente ecuación:

$$u(s) = K_p \left[\beta r(s) - y(s) + \frac{1}{T_i s} e(s) \right] + \frac{\tau}{k} \hat{\xi}(t) \quad (19)$$

Las Figuras 2 y 3 muestran los resultados de simulación obtenidos para un día soleado y un día

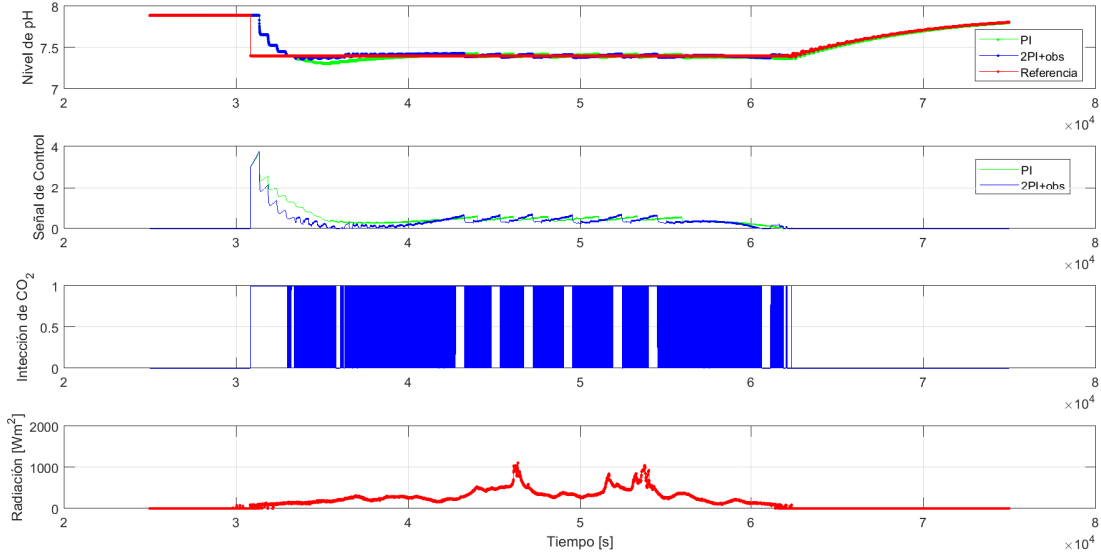


Figura 3: Validación del controlador para el día 21/11/2014

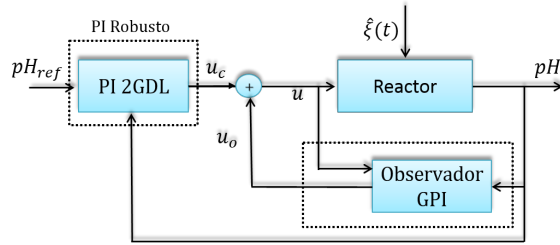


Figura 4: Esquema de control basado en observador GPI para fotobiorreactor

nublado, para el controlador PI con y sin observador de perturbaciones. En ambos casos el controlador con observador funciona ligeramente mejor que el PI sin observador y se puede verificar que en menos de 40 minutos y sin sopreimpulsos los niveles de pH siguen con exactitud el nivel de referencia fijado garantizando con ello un rechazo activo de las perturbaciones externas.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta la aplicación de una metodología para el diseño de controladores GPI en una planta de fotobiorreactores. En primer lugar, se utiliza un controlador PI de dos grados de libertad cuyo diseño se basa en la minimización de un funcional de coste y el valor máximo de sensibilidad permitido. Posteriormente, se utiliza el concepto de sistemas diferencialmente planos para diseñar un observador para el rechazo activo de perturbaciones.

Los resultados de simulación ratifican que el controlador propuesto estima en línea las perturbaciones externas medibles y no medibles y elimina activamente su efecto. El controlador es capaz de regular el pH tanto para días soleados como nublados y es robusto a pesar de las dinámicas no modeladas y las simplificaciones asumidas en el modelo de la planta.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con el Proyecto del Plan Nacional DPI2014-55932-C2-1-R del Ministerio de Economía y Competitividad y Fondos FEDER.

El autor Jose Carreño también agradece a la Escuela de Ingeniería Electrónica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander (Colombia) y a la Asociación Universitaria Iberoamericana de Posgrados por financiar los gastos de estancia.

Referencias

- [1] ABALDE, J., CID, A., FIDALGO, P., TORRES, E., AND HERRERO, C. *Microalgas: cultivo y aplicaciones*. Servicio de Publicaciones de la Universidade da Coruña, 1995.
- [2] ALFARO, V. M., AND VILANOVA, R. Model-reference robust tuning of 2dof pi controllers for first-and second-order plus dead-time controlled processes. *Journal of Process Control* 22, 2 (2012), 359–374.

- [3] ALFARO, V. M., AND VILANOVA, R. *Model-reference robust tuning of PID controllers*. Springer, 2016.
- [4] CORTÉS-ROMERO, J., JIMENEZ-TRIANA, A., CORAL-ENRIQUEZ, H., AND SIRA-RAMÍREZ, H. Algebraic estimation and active disturbance rejection in the control of flat systems. *Control Engineering Practice* 61 (2017), 173–182.
- [5] COSTACHE, T., FERNÁNDEZ, F. G. A., MORALES, M., FERNÁNDEZ-SEVILLA, J., STAMATIN, I., AND MOLINA, E. Comprehensive model of microalgae photosynthesis rate as a function of culture conditions in photobioreactors. *Applied microbiology and biotechnology* 97, 17 (2013), 7627–7637.
- [6] FERNÁNDEZ, I., ACIÉN, F., GUZMÁN, J., BERENGUEL, M., AND MENDOZA, J. Dynamic model of an industrial raceway reactor for microalgae production. *Algal Research* 17 (2016), 67–78.
- [7] FERNÁNDEZ, M., BERENGUEL, M., AND GUZMÁN, J. Modelado y control de fotobiorreactores industriales. *Universidad de Almería* (2014).
- [8] FLIESS, M., LÉVINE, J., MARTIN, P., AND ROUCHON, P. Flatness and defect of nonlinear systems: introductory theory and examples. *International journal of control* 61, 6 (1995), 1327–1361.
- [9] MENDOZA, J., GRANADOS, M., DE GODOS, I., ACIÉN, F., MOLINA, E., BANKS, C., AND HEAVEN, S. Fluid-dynamic characterization of real-scale raceway reactors for microalgae production. *Biomass and Bioenergy* 54 (2013), 267–275.
- [10] PAWLOWSKI, A., MENDOZA, J., GUZMÁN, J., BERENGUEL, M., ACIÉN, F., AND DORMIDO, S. Effective utilization of flue gases in raceway reactor with event-based ph control for microalgae culture. *Bioresource technology* 170 (2014), 1–9.
- [11] PENG, L., LAN, C. Q., AND ZHANG, Z. Evolution, detrimental effects, and removal of oxygen in microalga cultures: A review. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 32, 4 (2013), 982–988.
- [12] SIRA-RAMÍREZ, H., AND AGRAWAL, S. K. *Differentially flat systems*. CRC Press, 2004.
- [13] SIRA-RAMÍREZ, H., CORTÉS-ROMERO, J., AND LUVIANO-JUÁREZ, A. Robust linear control of nonlinear flat systems. In *Robust Control, Theory and Applications*. In-Tech, 2011.
- [14] WEISSMAN, J., AND GOEBEL, R. Design and analysis of pond system for the purpose of producing fuels. final report. *Solar Energy Research Institute, Golden CO, SERI/STR* (1987), 231–2840.

Control reset para maniobra de cambio de carril y validación con CarSim

Miguel Cerdeira, Pablo Falcón, Antonio Barreiro, Emma Delgado, Miguel Díaz-Cacho

Dpto. Enxeñería de Sistemas e Automática

Escola de Enxeñería Industrial

Universidade de Vigo, Galicia, Spain

Resumen

Se estudia la aplicación de control reset a una maniobra de cambio de carril comparándola con una técnica de control lineal convencional. Los resultados obtenidos atestiguan la capacidad de este tipo de control no lineal para superar en rendimiento a los controladores lineales afectados por las limitaciones fundamentales. Se ha comprobado la estabilidad del sistema tanto analíticamente como por simulación con el software de modelado dinámico CarSim.

Palabras clave: Maniobra de cambio de carril, Control reset, Condición H_β , CarSim.

1. INTRODUCCIÓN

Con el advenimiento progresivo de los vehículos autónomos ha surgido la necesidad de automatizar toda una batería de maniobras con el fin de dotar a los vehículos de absoluta funcionalidad para la variedad de situaciones que deben enfrentar. En este artículo se aborda el uso de control reset en una de estas maniobras, la de cambio de carril. Ésta, es una de las estudiadas más concienzudamente como atestiguan los numerosos artículos existentes, por ejemplo, [1], [2], [3], [4] que presentan distintas técnicas de control con el mismo objetivo, realizar el cambio de carril de manera segura y eficiente.

Los controladores reseteados son sencillamente reguladores estándar dotados con un mecanismo que reinicia a cero o a un determinado porcentaje uno o varios estados del controlador, siempre que se cumpla una determinada condición. La primera aplicación que trata el control reset está recogida en el trabajo de J. Clegg [5]. En este trabajo, Clegg demostró las ventajas de este tipo de control comparado con uno lineal. No obstante, a pesar de su utilidad, su estudio fue abandonado hasta los años 70, momento en el que el grupo de investigación de Horowitz lo recuperó [6, 7]. En estos artículos, se resaltó cómo el control reset ayuda a superar las limitaciones fundamentales que afectan a los sistemas lineales [8, 9]. Después de la publicación de estos artículos, el estudio del con-

trol reset fue abandonado hasta los años 90, momento a partir del cuál el número de grupos de investigación interesados en esta materia aumentó considerablemente. Una de las propuestas más interesantes presentadas recientemente es el PI+CI [10] que combina las ventajas del controlador PI con las del integrador de Clegg. En los últimos años, el control reset se ha empleado en diferentes aplicaciones tal y como se muestra en la siguiente monografía [11]. Aparte de las aplicaciones recogidas en [11], existen varios artículos que utilizan esta técnica de control no lineal en diversas aplicaciones vehiculares. En [12] se emplea un controlador reset para la reconfiguración de pelotones de vehículos estudiando como éste ayuda a superar las limitaciones fundamentales. [13] aborda el uso de esta técnica de control para una aplicación de control de cruce adaptativo. Otros ejemplos [14, 15] incluyen el estudio del efecto de control reset sobre un sistema de frenado ABS.

El objetivo de este trabajo es explorar el potencial del control reset en una maniobra de cambio de carril. Para tal propósito, se considera un escenario idealizado y un modelo cinemático sencillo para centrar el estudio en cómo el control reset mejora la maniobra. Para probar la estabilidad de todo el sistema (*controlador reset & planta linealizada*) se emplea una condición conocida como H_β basada en una función de Lyapunov cuadrática que debe ser decreciente en todo el espacio de estados y no incrementar en los instantes de salto [16].

Para la validación del modelo empleado, así como del controlador desarrollado, se recurre al software comercial CarSim desarrollado por Mechanical Simulation Corporation.

Este artículo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2, se presenta el modelo empleado para la maniobra de cambio de carril así como la validación del mismo con CarSim. A continuación, en el apartado 3 se exponen todas las consideraciones utilizadas para el diseño del controlador y se presentan resultados sobre la estabilidad del sistema. Por último, en la sección 4, se muestran los resultados de las simulaciones para finalmente presentar las conclusiones en la sección 5.

Tabla 1: Parámetros del modelo de vehículo

lf	Distancia desde el eje delantero al CM
lr	Distancia desde el eje trasero al CM
y	Posición lateral del vehículo
v_0	Velocidad longitudinal del vehículo
ψ	Guiñada
δ	Ángulo de las ruedas

2. MODELADO Y VALIDACIÓN

2.1. MODELO BICICLETA CINEMÁTICO

Para el modelado de la maniobra del vehículo se ha empleado el modelo bicicleta cinemático, representado en la Fig. 1 y cuyos parámetros están recogidos en la Tabla 1. La descripción detallada del modelo puede ser encontrada en [17]. Se denomina modelo bicicleta ya que se trabaja con la simplificación de que tanto las ruedas delanteras como las traseras están concentradas en el punto medio de cada uno de los dos ejes. Este modelo es adecuado para velocidades pequeñas [18]. Ya que se pretende que el controlador desarrollado trabaje a mayores velocidades, y por los motivos que se dan en el apartado de validación del modelo, habrá que modificar ligeramente el modelo para obtener resultados válidos. Otra simplificación que se ha tenido en cuenta es que al trabajar con ángulos de volante pequeños, puede linealizarse el modelo en torno al punto operativo del controlador. Las ecuaciones del modelo cinemático bicicleta en el espacio de estados pueden verse en (1) en donde y y ψ son los estados, δ es la actuación, Y es la salida que en este caso es igual al estado y y los coeficientes $b_1 = \frac{lf*v_0}{lf+lr}$ y $b_2 = \frac{v_0}{lf+lr}$.

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & v_0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ \psi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \delta \\ Y = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ \psi \end{pmatrix} + 0 * \delta \end{cases} \quad (1)$$

A partir de estas ecuaciones se puede obtener que la función de transferencia entre la entrada de actuación (ángulo de las ruedas delanteras) y la salida (posición lateral del centro de masas del vehículo CM) es igual a:

$$G_{teorica}(s) = \frac{y(s)}{\delta(s)} = \frac{b_1 s + v_0 b_2}{s^2} = \frac{lf*v_0}{lf+lr} \frac{s}{s^2} + \frac{v_0^2}{lf+lr} \frac{1}{s^2} \quad (2)$$

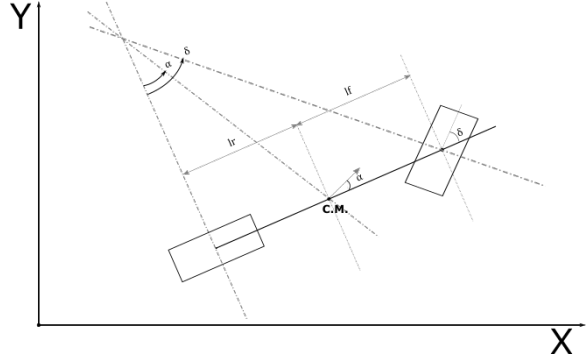


Figura 1: Modelo bicicleta cinemático.

2.2. VALIDACIÓN DEL MODELO CON CARSIM

Para la validación del modelo empleado en este trabajo se utilizó el software de simulación CarSim [19]. Este software es utilizado por numerosos fabricantes (OEMs) y suministradores de componentes del automóvil (Tier 1), universidades y centros de investigación de todo el mundo, siendo un estándar de la industria del automóvil. Existen varios trabajos en donde se puede observar que este software es útil en tareas de validación de modelos [20] y simulación de tráfico rodado [21].

La validación del modelo se ha realizado mediante la comparación del comportamiento del modelo propuesto en (1) frente a la respuesta obtenida del modelo interno de CarSim. El modelo interno que emplea CarSim es un modelo muy complejo que incluye por ejemplo la dinámica del vehículo, numerosas variables internas de los distintos componentes, tiempos de comunicaciones y actuación o el entorno del vehículo. En este caso, se trata de simplificar este complejo modelo en un modelo más sencillo de utilizar en el que se pueda sintonizar un controlador efectivo para la maniobra de cambio de carril. Primeramente es necesario particularizar el modelo propuesto para el coche escogido, en este caso se seleccionó un coche tipo Sedan clase D (ver Fig. 2).

Partiendo de (2), el modelo del Sedan viene dado por las características físicas del coche (lf y lr , ver Tabla 1) y la velocidad de cruce del vehículo v_0 . En este caso los parámetros son: $lf = 1,110m$, $lr = 1,670m$ y $v_0 = 90km/h$ ($25m/s$). Con estos valores, el modelo teórico del vehículo resultante es:

$$G_{teorica}(s) = \frac{9,982s + 224,8}{s^2} \quad (3)$$

Después de analizar varias pruebas, se ha compro-

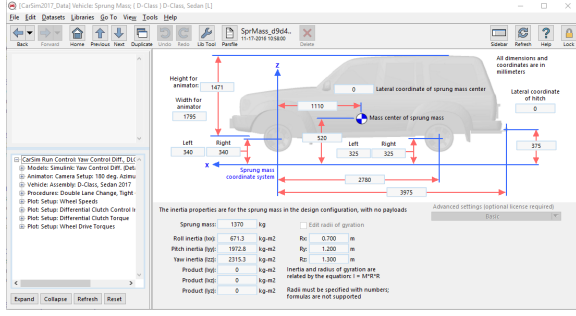


Figura 2: Vista de la pantalla de configuración del vehículo en CarSim.

bado que el modelo de CarSim se puede ajustar al modelo descrito en (1) con la salvedad de que existe un cierto adelanto entre los datos obtenidos con el modelo propuesto y los datos obtenidos directamente con el modelo interno de CarSim. Esto es debido en gran medida a que el modelo cinemático es válido a baja velocidad, mientras que a $v_0 = 90$ km/h aparecen otros efectos dinámicos. Por ello, se debe añadir un atraso en el modelo propuesto para ajustar mejor los datos obtenidos, este atraso puede ser aproximado por un primer orden con una constante de tiempo τ . Entonces el modelo propuesto completo es el descrito en (4).

$$G(s) = \frac{b_1 s + b_2 v_0}{s^2} \times \frac{1}{\tau s + 1} \quad (4)$$

El experimento realizado para la identificación de la planta se muestra en la Fig. 3. Como se puede observar en dicha figura, el experimento se trata de una maniobra controlada de cambio de carril en donde se modifica la consigna de posición lateral del vehículo mediante una entrada tipo escalón. La adquisición de los datos de la planta se realizó entre las señales u e y correspondientes a la entrada y la salida de la planta. Este experimento está basado en señales entrada-salida que se generan en una maniobra típica de cambio de carril. El bloque correspondiente al modelo de CarSim recibe entrada de giro de ruedas en grados y la salida es la posición lateral del centro de masas del vehículo.

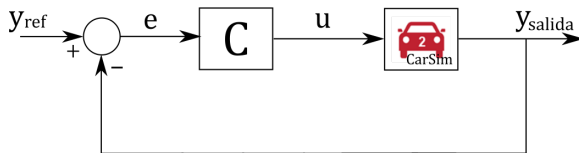


Figura 3: Sistema dispuesto para la identificación.

Se ha identificado la planta mediante el barrido de los parámetros de la función de transferencia sobre

los datos adquiridos en el simulador CarSim. Por las características físicas del vehículo la solución debe tener unos valores semejantes a la función de transferencia teórica. El resultado de la identificación se muestra en (5). El error cuadrático medio de la planta modelada y los datos adquiridos de la planta real es de $7,810 \times 10^{-3}$ metros, por lo que se puede considerar representativo de la planta real.

$$G(s) = \frac{8,3s + 169,8}{0,19s^3 + s^2} \quad (5)$$

O lo que viene a ser, empleando la forma descompuesta en planta más retraso de actuación:

$$G(s) = \frac{8,3s + 169,8}{s^2} \times \frac{1}{0,19s + 1} \quad (6)$$

En la Fig. 4 se observa la correspondencia que existe entre los datos extraídos de la respuesta temporal del modelo identificado y los datos obtenidos del modelo interno de CarSim. Se puede decir que para una velocidad $v_0 = 90$ km/h el modelo identificado es válido para el vehículo escogido y se puede proceder al diseño de un controlador apto para los experimentos con CarSim.

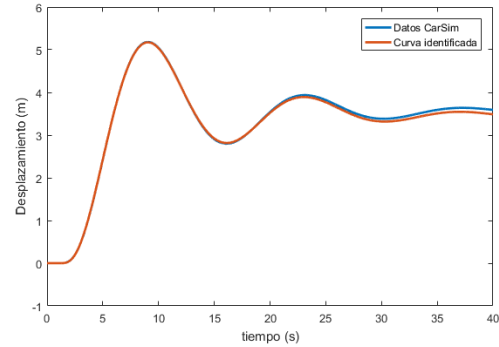


Figura 4: Comparación entre el modelo identificado y el modelo interno de CarSim.

3. CONTROL Y ESTABILIDAD

3.1. CONTROL

Tal como se mencionó en el apartado introductorio, el propósito de este artículo es explorar las ventajas potenciales del control reset en la maniobra de cambio de carril. Un controlador reset, con entrada $e(t)$ y salida $u(t)$, viene dado por (7) donde A_r es una matriz diagonal con unos en los estados que no son reseteados.

$$\begin{cases} \dot{x}_r(t) = A_r x(t) + B_r e(t) & \text{si } e(t) \neq 0 \\ x_r(t^+) = A_\rho x(t) & \text{si } e(t) = 0 \\ u(t) = C_r x_r(t) + D_r e(t) \end{cases} \quad (7)$$

Este tipo de controlador se comporta exactamente igual que un controlador lineal hasta que se da la condición de reinicio, siendo ésta normalmente el cruce por cero de la señal de error. Al controlador lineal al que se le dota del mecanismo de reinicio se le conoce como controlador lineal base. Para explotar el potencial del reinicio al máximo se deben considerar una serie de especificaciones de diseño para el controlador lineal base. Como es obvio, el controlador base debe presentar sobreoscilación para que se dispare el mecanismo de reinicio y su efecto surta efecto. [10] recoge una colección de reglas de sintonía para facilitar la obtención de un controlador reseteado óptimo.

Al contrario que los controladores lineales, los controladores reseteados no están afectados por las llamadas limitaciones lineales fundamentales. Por ejemplo, cuando en bucle abierto, nuestro sistema presenta un integrador, ha quedado probado que independientemente del regulador escogido, la señal de error está restringida por la igualdad $\int_0^\infty e(\tau) d\tau = 1/K_v$ [22], donde K_v es la ganancia de velocidad. La planta (6) para control lateral contiene un doble integrador y otras raíces, con lo que $K_v = \infty$. En este caso, cualquier controlador lineal estará afectado por la siguiente restricción:

$$\int_0^\infty e(\tau) d\tau = 0. \quad (8)$$

Los controladores reseteados, al no verse afectados por esta limitación, y, siempre que hayan sido bien sintonizados, proporcionan mejores respuestas que cualquier controlador lineal para los objetivos de diseño fijados. La justificación completa de como un controlador reseteado de idénticas características al empleado en este artículo produce una respuesta con un mejor régimen transitorio puede ser encontrada en [12].

Para el diseño del controlador lineal base, se ha partido del controlador desarrollado en [12] cuya respuesta temporal es idónea para esta aplicación. Para ello hay que aplicar dos adaptaciones. La primera es convertir la planta en $1/s^2$ como en [12]. Dado que el cero y el polo de (6) son bien conocidos, esto se puede conseguir con un bloque de prefiltrado $F(s)$ (9) que cancela dichas raíces, ver Fig. 5.

$$F(s) = \frac{0,19s + 1}{8,3s + 169,8} \quad (9)$$

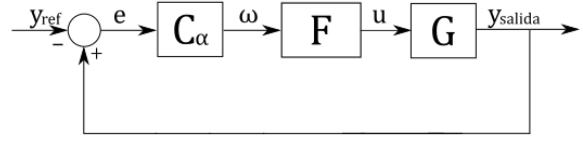


Figura 5: Lazo de control.

Obteniéndose de este modo una planta $P(s) = F(s) * G(s)$ equivalente a $1/s^2$.

La segunda adaptación es incorporar en el controlador de [12] un par de parámetros adicionales k y α , que confieren flexibilidad al diseño.

La función de transferencia de controlador de partida de [12] es (10).

$$C(s) = \frac{2(s + 0,01)}{(s + 0,5)(s + 2)(s + 3)} \quad (10)$$

Y el controlador propuesto es (11).

$$C_\alpha(s) = \frac{k * (\frac{s}{\alpha} + 0,01)}{(\frac{s}{\alpha} + 0,5)(\frac{s}{\alpha} + 2)(\frac{s}{\alpha} + 3)} \quad (11)$$

Primeramente se debe relacionar la sobreoscilación del controlador con la ganancia que se introduce a través del parámetro k , esto es importante para restringir la amplitud máxima de posición lateral del vehículo y que éste no salga de los límites del carril.

En segundo lugar, a través del parámetro α se puede modificar la respuesta temporal del controlador haciendo que los requerimientos de aceleración y jerk máximos no superen las limitaciones de confort. En [23] se establece un límite para aceleración lateral de $0,05g[m/s^2]$ y un límite de jerk lateral de $0,1g[m/s^3]$, siendo g el módulo de la aceleración de la gravedad.

Si se parte de una señal en el dominio de Laplace tal que $D(s)$ que equivale a $d(t)$ en dominio temporal y se aplica el factor $\alpha > 1$ de la forma que la señal sea $D(s/\alpha)$, entonces la respuesta temporal es $d(\alpha t)$, lo que hace que la señal resultante sea α veces más rápida. Al variar el valor de α se acelera ($\alpha > 1$) o ralentiza ($\alpha < 1$) la respuesta temporal del sistema, como se observa en la Fig. 6. Este cambio, al derivar usando la ley de la cadena, modifica la velocidad del sistema por α , la aceleración por α^2 y jerk por α^3 . Lo que permite ajustar el controlador y planta a los límites demandados de aceleración y jerk máximos.

Cabe destacar que la planta $P(s)$ se debe modificar del mismo modo que el controlador C_α siendo la nueva planta del sistema $P_\alpha(s) = 1/(s^2/\alpha^2)$. El coeficiente α^2 será absorbido por el controlador,

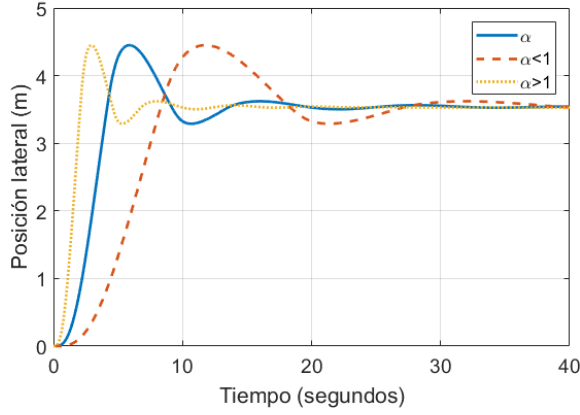


Figura 6: Respuestas obtenidas variando el valor de α

como $P_\alpha = \alpha^2 P$ entonces el controlador real será $C_\alpha \alpha^2$.

En el controlador presentado en [12], solamente uno de los tres estados del controlador era reseteado. En nuestro controlador modificado, $s = -0,5 * \alpha$ ha sido escogido por ser el más próximo al origen y por tanto, el más lento. Se separa por tanto el elemento $\frac{1}{s/\alpha+0,5}$ y se constituye lo que se conoce como First Order Reset Element (FORE) cuyas ecuaciones pueden verse en (12) siendo ζ la salida del FORE. De esta manera, el controlador puede ser expresado mediante $C_\alpha(s) = C_1(s)C_2(s)$ donde $C_1(s)$ es la función de transferencia del FORE, parte no lineal, y $C_2(s)$ es la función de transferencia de la parte lineal.

$$\begin{cases} \dot{\zeta}(t) = -0,5\alpha\zeta(t) + \alpha e(t) & \text{si } e \neq 0 \\ \zeta(t^+) = 0 & \text{si } e = 0 \end{cases} \quad (12)$$

En la Fig. 7 puede apreciarse cómo el FORE ha sido emplazado antes de la parte lineal para evitar que la salida del controlador sea directamente la salida del FORE y conseguir de esta manera que la salida final del controlador no presente saltos.

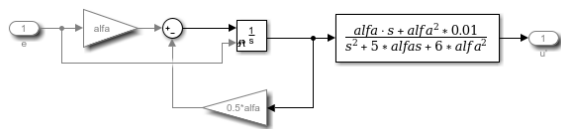


Figura 7: Controlador propuesto.

El controlador propuesto (11) adaptado con los parámetros $k = 1,3$ y $\alpha = 0,645$ proporciona la respuesta temporal mostrada en las Fig. 8, 9 y 10 de posición, aceleración y jerk respectivamente. Como se puede ver, los límites de aceleración y jerk laterales se cumplen para el sistema formado por

el controlador ajustado C_α y la planta P_α pero no así para el sistema formado por el controlador de partida $C(s)$ y la planta $P(s)$.

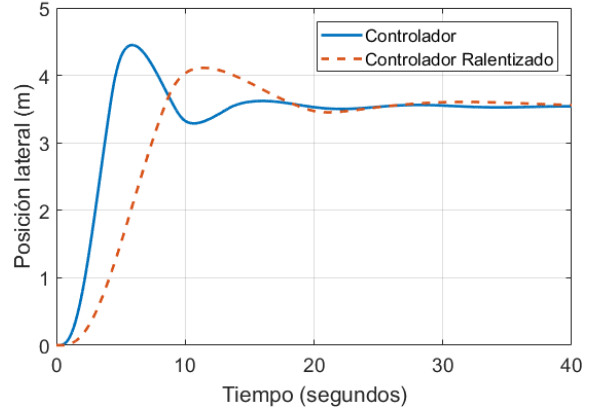


Figura 8: Comparativa de la posición lateral.

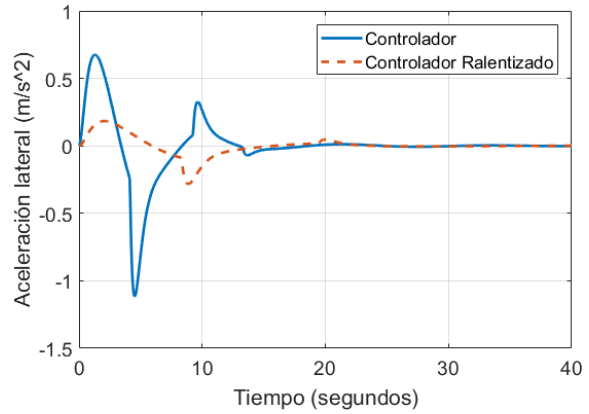


Figura 9: Comparativa de la aceleración lateral.

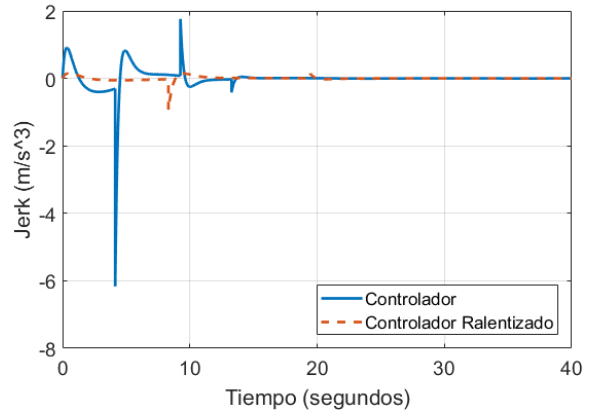


Figura 10: Comparativa de jerk lateral.

3.2. ESTABILIDAD

Para probar la estabilidad del sistema se ha empleado una condición conocida como H_β definida

para los sistemas con control reset. Así como fue presentado en la introducción, esta condición está basada en una función de Lyapunov cuadrática que debe ser decreciente en todo el espacio de estados conjuntamente con las trayectorias del sistema y no incrementar en los instantes de salto [16]. Se trata de una herramienta que permite comprobar la estabilidad fácilmente mediante el uso de LMIs o directamente a través de gráficas frecuenciales. Se ha optado en este artículo por el segundo método.

Para comprobar la condición H_β se considera un sistema de control en lazo cerrado de estado $x = (x_p^\top, x_r^\top)^\top$ de dimensión $n = n_p + n_r$, dado por:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax & \text{si } e = C_p x_p \neq 0 \\ x_r(t^+) = 0 & \text{si } e = C_p x_p = 0 \end{cases}$$

Siendo la respuesta frecuencial $H_\beta(j\omega)$ ($n_r \times n_r$)

$$H_\beta(j\omega) = H(j\omega I - A)^{-1} B \quad (13)$$

donde $H(n_r \times n)$ vale:

$$H = (\beta C_p, P_3) \quad (14)$$

y donde $B(n \times n_r)$ es:

$$B = (0, I_{n_r})^\top \quad (15)$$

Entonces se prueba ([11], [16]) que el sistema de control es asintóticamente estable si $H_\beta(j\omega)$ es SPR (positiva real estricta).

En la Fig. 11 se ve como para $\beta = 0,5$ se satisface H_β , es decir, para cualquier frecuencia se cumple que la parte real de los autovalores de la matriz $H(j\omega)$, que en este caso es escalar, siempre es positiva. Del cumplimiento de la condición se deduce que el sistema es cuadráticamente estable. Al mismo resultado se puede llegar por inspección directa del diagrama de Nyquist para $\beta = 0,5$ (ver Fig. 12) ya que de ella se desprende que $H_\beta(j\omega)$ es estrictamente positiva.

4. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS CON CARSIM

La validación del controlador de cambio de carril se realiza con el sistema planteado en la Fig. 5 mediante simulación sustituyendo el bloque $G(s)$ por el bloque de CarSim, ya mostrado en la Fig. 3.

Se ha planteado un experimento donde se dispone un vehículo tipo Sedan sobre una carretera en línea recta a una velocidad constante de 90 km/h,

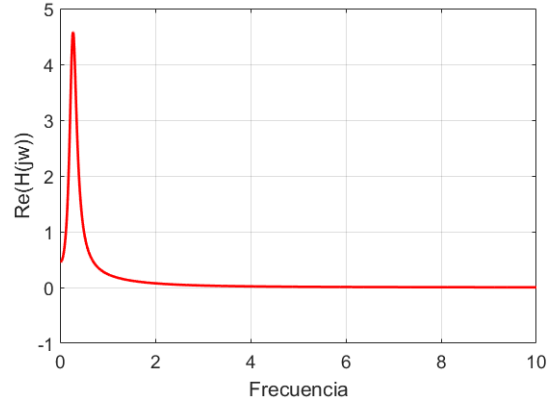


Figura 11: $Re(H_\beta(j\omega))$ vs ω para $\beta = 0,5$

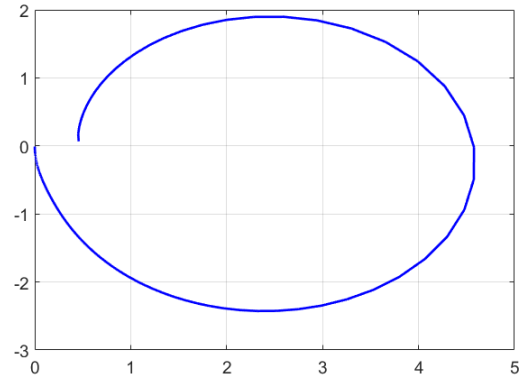


Figura 12: Nyquist de $H_\beta(j\omega)$ para $\beta = 0,5$

y se aplica en $t = 1s$ un cambio de consigna tipo escalón de 3.5 metros que hace que el vehículo se desplace lateralmente y cambie de carril.

En el experimento se prueba la valía del control reset para la maniobra de cambio de carril en carretera directamente sobre CarSim. El controlador reseteado diseñado permite obtener mejores resultados frente a un controlador lineal convencional como se puede apreciar en la Fig. 13. Se muestra como el controlador reseteado es claramente mejor que el controlador lineal base. La clave de la propuesta es que también es mejor que cualquier otro controlador lineal, sometido a la limitación (8), para ciertos objetivos de diseño. Estos objetivos se detallan en [12], que combinan una fase de subida suave, sobreoscilación baja y establecimiento rápido, y solo son alcanzables con la estrategia de reset. Esta estrategia de control logra realizar el cambio de carril rápidamente evitando la sobreoscilación que se produce en el caso del controlador lineal. Además, las señales de actuación provenientes de los controladores no tienen valores excesivamente exigentes por lo que es perfectamente aplicable sobre el vehículo.

En las Fig. 15 y 16 se pueden comprobar los límites de confort de la aceleración lateral y el *jerk*

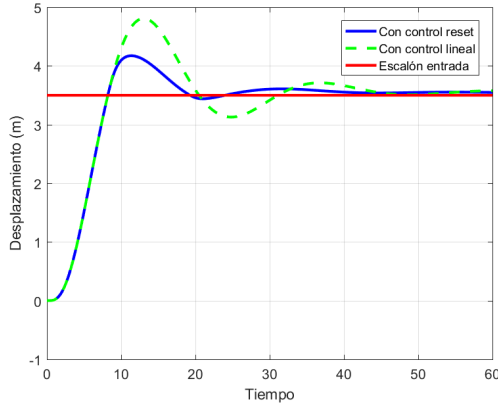


Figura 13: Respuesta del vehículo ante entrada escalón de 3.5 metros de desplazamiento lateral.

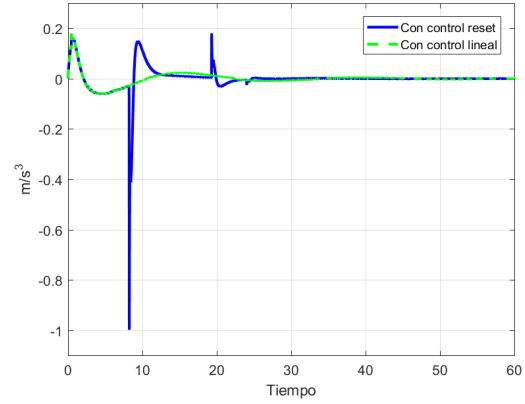


Figura 16: Componente Y (lateral) del jerk del centro de masas del vehículo.

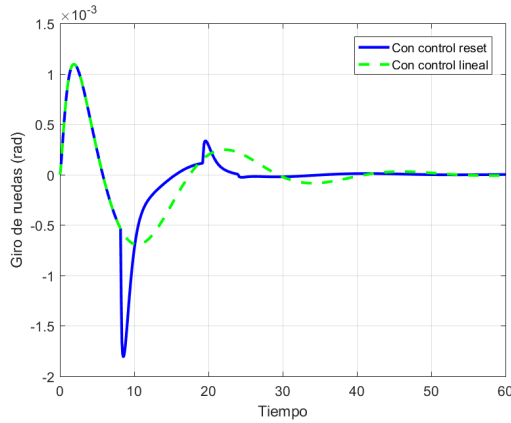


Figura 14: Señales de control aplicadas sobre el bloque CarSim, ángulo de ruedas en radianes.

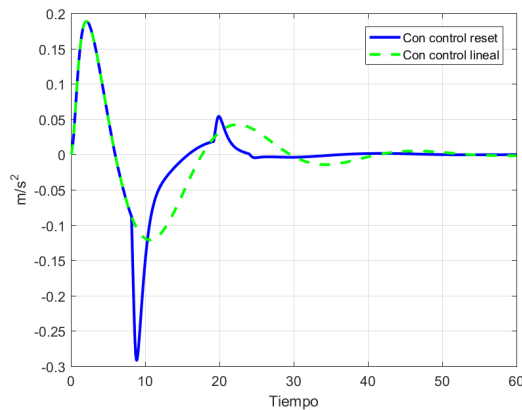


Figura 15: Componente Y (lateral) de la aceleración del centro de masas del vehículo.

respectivamente. Como se detalla en [23] y en el apartado 3.1, los valores obtenidos para la maniobra de cambio de carril no superan los valores límite en ninguno de los dos casos.

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

El objetivo de este trabajo ha sido explorar el potencial del control reset para una maniobra de cambio de carril comparando su rendimiento con el de un controlador lineal. Para hacer esto, se ha empleado un modelo sencillo para la sintonización del controlador. Se ha podido concluir que la aplicación del control reset permite obtener un regulador con mejor respuesta en régimen transitorio que el lineal y que igualmente presenta estabilidad robusta, siempre respetando los límites de confort para los ocupantes. CarSim ha sido utilizado tanto para la validación del modelo como para la del controlador y de su uso se desprende que el vehículo responde bien ante saltos en la señal de actuación (instantes de reinicio) y que por tanto, sería implementable en un vehículo real.

En cuanto a las líneas futuras se tratará de trabajar sobre el modelo dinámico del coche, ya que el modelo cinemático es válido a bajas velocidades y debe ser estimado para cada velocidad de funcionamiento. Otra modificación será añadir la actuación directamente sobre el volante de dirección del vehículo, lo que hará más realista la aplicación con la introducción de los correspondientes retardos de actuación del propio vehículo.

Agradecimientos

Este trabajo está financiado por MINECO, España, proyectos DPI2013-47100-C2-2-P y DPI2016-79278-C2-2-R y fondos FEDER.

Referencias

- [1] Ni, L., Gupta, A., Falcone, P., Johansson, L. (2016). Vehicle Lateral Motion Con-

- trol with Performance and Safety Guarantees. IFAC-PapersOnLine, 49(11), 285-290.
- [2] Naranjo, J. E., Gonzalez, C., Garcia, R., De Pedro, T. (2008). Lane-change fuzzy control in autonomous vehicles for the overtaking maneuver. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 9(3), 438-450.
 - [3] Hatipoglu, C., Ozguner, U., Redmill, K. A. (2003). Automated lane change controller design. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 4(1), 13-22.
 - [4] Hahn, S., Zindler, K., Jumar, U. (2016). Two-Degrees-of-Freedom Lateral Vehicle Control using Nonlinear Model Based Disturbance Compensation. IFAC-PapersOnLine, 49(11), 182-189.
 - [5] Clegg, J. C. (1958). A nonlinear integrator for servomechanisms. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry, 77(1), 41-42.
 - [6] Horowitz, I. (1982). Quantitative feedback theory. In IEE Proceedings D-Control Theory and Applications (Vol. 129, No. 6, pp. 215-226). IET.
 - [7] Horowitz, I., Rosenbaum, P. (1975). Nonlinear design for cost of feedback reduction in systems with large parameter uncertainty. International Journal of Control, 21(6), 977-1001.
 - [8] Seron, M. M., Braslavsky, J. H., Goodwin, G. C. (2012). Fundamental limitations in filtering and control. Springer Science and Business Media.
 - [9] Åström, K. J. (2000). Limitations on control system performance. European Journal of Control, 6(1), 2-20.
 - [10] Baños, A., Vidal, A. (2007, June). Design of PI+ CI Reset Compensators for second order plants. In Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on (pp. 118-123). IEEE.
 - [11] Baños, A., Barreiro, A. (2011). Reset control systems. Springer Science and Business Media.
 - [12] Costas, A., Cerdeira-Corujo, M., Barreiro, A., Delgado, E., Baños, A. (2016, September). Car platooning reconfiguration applying reset control techniques. In Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2016 IEEE 21st International Conference on (pp. 1-8). IEEE.
 - [13] Costas, A., Cerdeira-Corujo, M., Barreiro, A., Delgado, E., Baños, A. (2016). Control basado en Reset para seguimiento de consigna en el sistema de Control de Crucero Adaptativo. Jornadas de Automática.
 - [14] Cerdeira-Corujo, M., Costas, A., Delgado, E., Barreiro, A., Baños, A. (2016). Gain-scheduled wheel slip reset control in automotive brake systems. In Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2016 International Symposium on (pp. 1255-1260). IEEE.
 - [15] Cerdeira-Corujo, M., Costas, A., Delgado, E., Barreiro, A. (2017). Comparative Analysis of Gain-Scheduled Wheel Slip Reset Controllers with Different Reset Strategies in Automotive Brake Systems. In CONTROLO 2016 (pp. 751-761). Springer International Publishing.
 - [16] Beker, O. (2001). Analysis of reset control systems. Ph.D. thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Massachusetts, Amherst, MA.
 - [17] Åström, K. J., Murray, R. M. (2010). Feedback systems: an introduction for scientists and engineers. Princeton university press.
 - [18] Rajamani, R. (2011). Vehicle dynamics and control. Springer Science and Business Media.
 - [19] CarSim. Mechanical Simulation Corporation. Descripción general, <http://carsim.com/products/carsim/index.php>, 2017.
 - [20] Kinjawadekar, T., Dixit, N., Heydinger, G. J., Guenther, D. A., Salaani, M. K. (2009). Vehicle dynamics modeling and validation of the 2003 Ford Expedition with ESC using CarSim (No. 2009-01-0452). SAE Technical Paper.
 - [21] Benekahal, R. F., Treiterer, J. (1988). CAR-SIM: Car-following model for simulation of traffic in normal and stop-and-go conditions. Transportation research record, (1194).
 - [22] Freudenberg, J. S., Middleton, R. H., Braslavsky, J. H. (1995). Inherent design limitations for linear sampled-data feedback systems. International Journal of Control, 61(6), 1387-1421.
 - [23] Chee, W., Tomizuka, M. (1994, June). Lane change maneuver of automobiles for the intelligent vehicle and highway system (IVHS). In American Control Conference, 1994 (Vol. 3, pp. 3586-3587). IEEE.

Maniobra de aterrizaje automática de una Cessna 172P modelada en FlightGear y controlada desde un programa en C

Mario de la Rosa

Universidad de Sevilla, Camino de los descubrimientos s/n, 41092, mardeltri@gmail.com

Antonio J. Gallego

Universidad de Sevilla, Camino de los descubrimientos s/n, 41092, antgallen@gmail.com

Eduardo F. Camacho

Universidad de Sevilla, Camino de los descubrimientos s/n, 41092, efcamacho@us.es

Resumen

Es bien conocido que las maniobras de aterrizaje y despegue son las más complejas del vuelo de las aeronaves. En efecto, un gran porcentaje de los accidentes aéreos se da en la ejecución de estas operaciones. Si además se tiene en cuenta que la mayoría de estos accidentes se deben a errores humanos, es evidente la necesidad de un control automático que garantice la correcta ejecución de estas fases de vuelo. En este artículo se plantea una estrategia de aterrizaje sencilla y eficaz que hace uso de una estructura jerárquica de controladores PID. Para modelar la dinámica de la aeronave se empleará FlightGear, que es un simulador de vuelo de código abierto que ofrece un alto grado de realismo. El sistema de control de vuelo (Flight Control System, FCS) se incluye en un programa en C que se comunica con FlightGear mediante sockets UDP. Para llevar a cabo esta maniobra se ha desarrollado un sistema de guiado que se encarga de enviar las consignas a los controles implementados. Finalmente, cabe destacar que el aterrizaje se realizará en el aeropuerto de Sevilla con una Cessna 172P.

Palabras clave: Controlador PID, Aterrizaje automático, FlightGear, Matlab, Simulink, Simulación en tiempo real

1 INTRODUCCIÓN

La correcta ejecución de las maniobras de aterrizaje y despegue es clave tanto en la aviación comercial como en la general. Según se indica en [2] el 12 % de los accidentes de aviones comerciales se dan en las maniobras de aterrizaje y ascenso inicial, mientras que el 49 % se dan en la aproximación final y el aterrizaje. Con estas cifras queda de manifiesto la necesidad del desarrollo de controles automáticos para garantizar la seguridad en estas fases de vuelo.

En la literatura se exponen estrategias de control cuyo desarrollo depende de los parámetros con los que se modelan la aeronave. Como ejemplo de estos algoritmos se tiene [3], que usa un control de seguimiento de modelo y control H_∞ para el control de una aeronave durante el aterrizaje. En este caso se emplea el simulador de vuelo X-Plane conectado con Matlab. De forma análoga, en [5] se expone un sistema de control de aterrizaje basado en inversión de la dinámica y control H_∞ . Finalmente en [1] se comparan tres controladores basados en el espacio de estados (MPC, LQR y LQR con planificación de ganancias), además en este artículo se trata cómo realizar la comunicación entre Matlab y FlightGear.

En este artículo se propone una estrategia de control jerárquico basada en PID y aplicada a una avioneta modelada en FlightGear. Se asume que este programa es una caja negra para el programa de control, tal y como lo sería un avión real. Esta estrategia se beneficia del alto grado de realismo proporcionado por FlightGear que usa modelos de la dinámica del vuelo realistas y altamente consolidados. Se trata de ecuaciones del movimiento no lineales junto con modelos aerodinámicos complejos.

El artículo comienza presentando una descripción de FlightGear en la sección 2. A continuación, la sección 3 incluye una descripción del sistema de guiado empleado para la generación de referencias que recibe el sistema de control, cuya estructura se detalla en la sección 4. Con el fin de validar las metodologías seguidas, la sección 5 presenta los resultados del vuelo de aterrizaje en FlightGear. Finalmente, en la sección 6 se exponen las conclusiones obtenidas.

2 MODELO FLIGHTGEAR

Este artículo usa FlightGear no solo como una herramienta de visualización sino también como una herramienta de modelado. FlightGear es un sim-

ulador de vuelo sofisticado, gratuito y completamente de código abierto. Este programa contiene una gran variedad de modelos de aeronaves como son: planeadores, helicópteros, cazas y aviones comerciales.

Actualmente FlightGear usa dos modelos de la dinámica del vuelo: JSBSIM y YAsim. Así mismo, se utiliza un modelo de terreno, TerraGear, y también se incluyen efectos atmosféricos.

JSBSIM emplea la ecuación de Newton para obtener la aceleración del centro de gravedad de la aeronave con respecto un sistema fijo a Tierra y con origen en el centro de la misma (Earth Centered Earth Fixed, ECEF):

$${}^b\dot{\mathbf{v}}_{CM/e} = \mathbf{F}_{A,T}/m - (\omega_{b/e} + 2\omega_{e/i}) \times \mathbf{v}_{CM/e}^b \quad (1)$$

donde ${}^b\dot{\mathbf{v}}_{CM/e}^b$ es la derivada respecto a los ejes cuerpos de la velocidad del centro de masas respecto a los ejes ECEF, $\mathbf{F}_{A,T}^b$ es el conjunto de fuerzas aerodinámicas y propulsivas en ejes cuerpo, m es la masa de la aeronave, $\omega_{b/e}^b$ es la velocidad angular de los ejes cuerpo respecto a los ECEF expresada en ejes cuerpo, $\omega_{e/i}$ es la velocidad angular de los ejes ECEF con respecto a los inerciales expresada en ejes cuerpo, y $\mathbf{v}_{CM/e}^b$ es la velocidad del centro de masas respecto al sistema ECEF expresado en ejes cuerpo

La aceleración angular del sistema ejes cuerpo con respecto a los ejes inerciales viene dada por la siguiente relación:

$${}^b\dot{\omega}_{b/i} = (J^b)^{-1} [\mathbf{M}_{A,T}^b - \omega_{b/i}^b \times J^b \omega_{b/i}^b] \quad (2)$$

donde ${}^b\dot{\omega}_{b/i}$ es la derivada respecto a los ejes cuerpo de la velocidad angular de los ejes cuerpo respecto a los ejes inerciales, J^b es la matriz de inercia expresada en ejes cuerpo, y $\mathbf{M}_{A,T}^b$ son los momentos aerodinámicos y propulsivos en ejes cuerpo.

Se puede encontrar más información sobre el modelo en [9] o en [8].

3 SISTEMA DE GUIADO

El sistema de guiado de la aeronave es el encargado de establecer las consignas recibidas por los controladores. En la figura 1 se muestra esquemáticamente cuales son las entradas y salidas de dicho sistema. Se reciben dos entradas: la posición actual de la aeronave, que se actualiza continuamente, y los *waypoints* de paso, que pueden definirse tanto *online*, como *offline*, en este caso se empleará una planificación estratégica.

En primer lugar, en la sección 3.1, se establecerán los puntos de referencia y las consignas necesarias

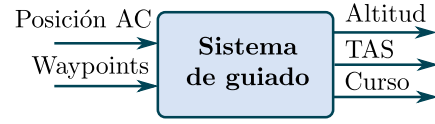


Figura 1: Sistema de guiado

para poder realizar un aterrizaje en el aeropuerto de Sevilla. Una vez definida la trayectoria, es necesario implementar un mecanismo de guiado que seleccione automáticamente el punto objetivo. El funcionamiento del mismo se tratará en detalle en la sección 3.2.

3.1 Trayectoria de aproximación

La trayectoria de aproximación se definirá a partir de una serie de puntos de paso, *waypoints*, que quedan definidos por su latitud, longitud y altitud. Además, a cada uno de ellos se le ha asociado una velocidad, que será la velocidad de referencia desde dicho punto hasta el siguiente. Ver figuras Cabe destacar que las trayectorias de aproximación de los aeropuertos españoles están establecidas por ENAIRE. Dependiendo del sistema disponible para realizar la aproximación existen diferentes rutas a seguir. Por ejemplo, si se utilizase ILS (Instrumental Landing System), la trayectoria vertical a seguir sería la mostrada en la figura 2 [4]. Sin embargo, en este artículo, se realizará una aproximación visual, lo cual permitirá definir la trayectoria libremente. De esta forma se podrá mostrar el funcionamiento de los distintos controladores, haciendo así el aterrizaje más atractivo desde el punto de vista del control.

Punto	Latitud[°]	Longitud[°]
Posición inicial	37.426564	-6.014983
FAF	37.4175	-5.9925
Punto A	37.417663	-5.954661
Punto B	37.417839	-5.914728
Pista	37.417991	-5.887864

Tabla 1: Lista de waypoints (latitud y longitud)

Punto	Altitud[ft]	Velocidad[knot]
Posición inicial	1000	85
FAF	1000	85
Punto A	700	80
Punto B	250	70
Pista	80	60

Tabla 2: Lista de waypoints (altitud y velocidad)

En la figura 4 se muestra el perfil de descenso que se ha establecido. Inicialmente el avión se encuentra en el punto “posición inicial” a una altitud de 1000 ft con una velocidad de 85 knot, desde aquí

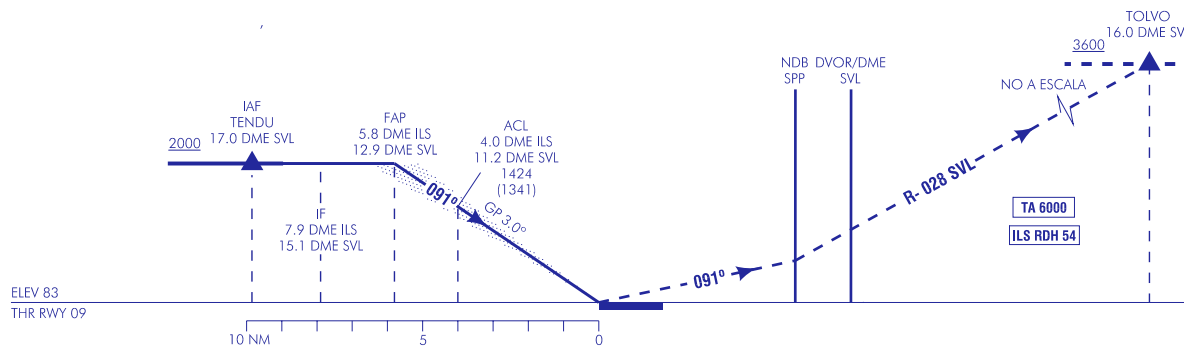


Figura 2: Senda de aproximación con ILS

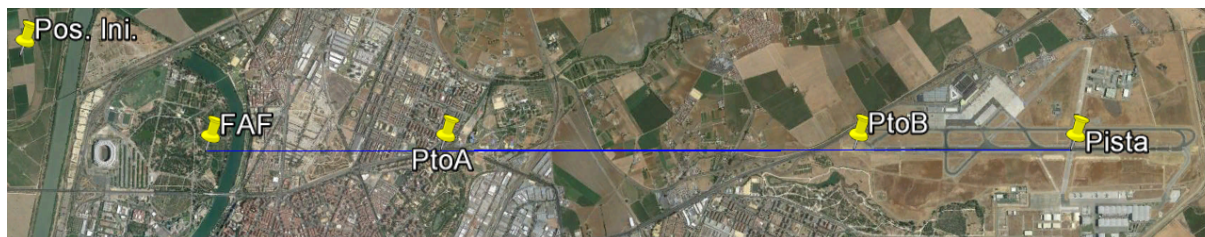


Figura 3: Puntos de paso proyectados

se dirigirá al FAF (Final Approach Fix) a una altitud de 1000 ft y una velocidad de 85 knot. El siguiente punto objetivo será el punto A, al cual se acercará a una altitud de 700 ft y una velocidad de 85 knot. Una vez alcance este punto se dirigirá al punto B a una altitud de 250ft y una velocidad de 70 knot. En el punto B cambiará el control de la velocidad aerodinámica, a partir de este momento la velocidad aerodinámica se controlará con el cabeceo y se impondrá la posición de palanca.

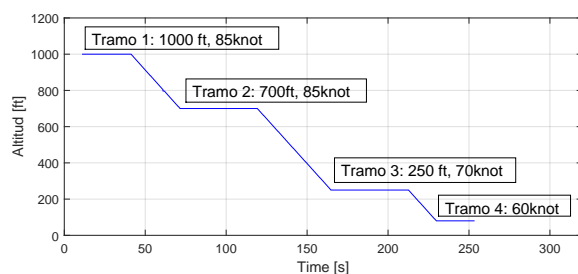


Figura 4: Perfil de descenso

3.2 MECANISMO DE GUIADO

En esta sección se definirá el algoritmo de guiado empleado, es decir, cómo se determinan las consignas a partir de la lista de *waypoints* y la posición de la aeronave.

3.2.1 Selector de waypoints

El selector de waypoints será el encargado de seleccionar el waypoint objetivo. Para ello se calcula la distancia hacia el punto siguiente y cuando la misma es menor de 500 m, se selecciona el siguiente waypoint de la lista. La distancia se ha calculado como se indica a continuación:

$$d_{wp} = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3)$$

siendo

$$x = R_{mer}(\phi_{AC} - \phi_{wp}) \quad (4)$$

$$y = R_{norm} \cos(\phi_{wp})(\lambda_{AC} - \lambda_{wp}) \quad (5)$$

donde R_{mer} es el radio de curvatura del meridiano, R_{norm} el radio de curvatura normal, ϕ_{AC} y λ_{AC} son la latitud y longitud de la aeronave(*aircraft*) y ϕ_{wp} y λ_{wp} son la latitud y longitud del *waypoint* de destino. R_{mer} y R_{norm} son los radios de curvatura a lo largo de líneas de latitud y longitud constantes respectivamente. Las ecuaciones para su cálculo se pueden consultar en el capítulo 4, sección 4.1 de [7].

Una vez seleccionado el waypoint se tendrán las coordenadas del punto objetivo, la altura y la velocidad aerodinámica de referencia.

Por último cabe destacar que esta referencia de altitud no es la que recibe directamente el controlador. Esto se debe a que la tasa de variación de la referencia está limitada con el objetivo de conseguir una respuesta del controlador más suave y precisa.

3.2.2 Referencia de curso

La referencia de curso se debe calcular en función de la posición de la aeronave en cada momento. En primer lugar se implementó un algoritmo que calculaba el curso determinando la dirección de la recta que une la aeronave y el punto objetivo, es decir:

$$\psi = \text{atan} \left(\frac{R_{norm} \cos(\phi_{AC})(\lambda_{wp} - \lambda_{AC})}{R_{mer}(\phi_{wp} - \phi_{AC})} \right) \quad (6)$$

Sin embargo este método no proporcionaba un resultado aceptable ya que pequeños errores en el curso hacían que la dirección de aproximación a la pista no fuese la que se buscaba. Además, cuando la aeronave se iba acercando al *waypoint* objetivo, el curso comenzaba a variar de forma notable provocando que la avioneta oscilase al llegar a cada *waypoint*.

Este problema fue solventado implementando un método de seguimiento basado en campos vectoriales [6]. El objetivo de este algoritmo es asociar a la aeronave un vector de curso de referencia en función de la posición en la que se encuentra. Este método se describe en detalle a continuación.

En primer lugar se determina el curso de la recta que se desea seguir:

$$\psi_{12} = \text{atan} \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \quad (7)$$

siendo x_2 e y_2 las coordenadas del punto objetivo y x_1 e y_1 las del *waypoint* anterior. En segundo lugar se determina el error lateral:

$$e_{lat} = (x_1 - x) \sin(\psi_{12}) + (y - y_1) \cos(\psi_{12}) \quad (8)$$

siendo x e y las coordenadas de la aeronave.

Las coordenadas cartesianas se han obtenido a partir de la latitud y la longitud tomando como referencia el ARP (*Airport Reference Point*) del aeropuerto de Sevilla.

$$x = R_{mer}(\phi - \phi_{ARP}) \quad (9)$$

$$y = R_{norm}(\lambda - \lambda_{ARP}) \quad (10)$$

Por último, la consigna de curso se calcula empleando la siguiente expresión:

$$\psi = \psi_{12} - \psi_{\infty} \frac{2}{\pi} \text{atan}(K_{path} e_{lat}) \quad (11)$$

siendo ψ_{∞} y K_{path} dos variables de diseño. La primera hace referencia al valor del curso de aproximación a la recta cuando la aeronave se encuentra muy alejada de la misma y K_{path} define la suavidad del acercamiento a la recta.

4 ESTRUCTURA DE CONTROL

Para controlar la aeronave se ha planteado una estructura de control jerárquica que cuenta con dos capas: el controlador de alto nivel y el de bajo. El primero recibe las consignas del sistema de guiado es decir, la altitud, el curso y la velocidad aerodinámica. El segundo es el encargado de garantizar el seguimiento de las referencias que el controlador de alto nivel define: cabeceo y alabeo.

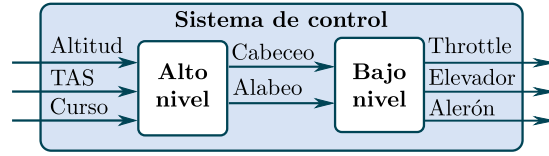


Figura 5: Sistema de control

En todos los controladores se ha implementado una *anti-windup* para evitar que el término integral aumente indefinidamente.

4.1 CONTROLADOR DE ALTO NIVEL

El controlador de alto nivel incluye tres controladores: el control de altitud, el control de curso y el control de velocidad aerodinámica. A continuación se detalla cada uno de ellos.

4.1.1 Control de altitud

El control de altitud recibe la referencia de altitud y envía al controlador de bajo nivel la referencia de cabeceo. El método utilizado para implementar el PI ha sido de implementación directa tal y como se muestra en la siguiente relación:

$$\theta_{ref} = \theta_{trim} + k_p(e_k + \frac{T}{T_i} I_k) \quad (12)$$

siendo I_k el valor del término integral que se calcula como se indica a continuación:

$$I_k = I_{k-1} + e_k \quad (13)$$

Como se observa, se ha incluido un término de trimado con el objetivo de reducir el esfuerzo del término integral. Este valor, θ_{trim} , se calcula en función de la velocidad de referencia.

$$\theta_{trim} = 0.002 \cdot TAS_{ref}^2 - 0.472 \cdot TAS_{ref} + 27.72 \quad (14)$$

Los coeficientes de esta función cuadrática se han obtenido ajustando la función a los valores obtenidos en varias simulaciones para cruceros a diferentes velocidades.

4.1.2 Control de curso

El control de curso se realiza con un PI que recibe las señales del navegador y mantiene el curso

impuesto enviando una consigna de alabeo. El controlador implementado es un PI con implementación directa:

$$\phi_{ref} = k_p(e_k + \frac{T}{T_i} I_k) \quad (15)$$

Siendo I_k el valor del término integral que se calcula como se indica a continuación:

$$I_k = I_{k-1} + e_k \quad (16)$$

4.1.3 Control de TAS

Para el control de la velocidad aerodinámica verdadera (*True Airspeed*, TAS) se han diseñado dos controladores: uno para controlar la velocidad a través de la posición de palanca (*throttle*) y otra a partir del cabeceo.

Control de TAS con throttle

Se ha implementado un PI para controlar la velocidad aerodinámica con la posición de palanca. Las entrada de este controlador es la consigna de velocidad del sistema de navegación y la salida es la posición de palanca establecida. Se ha empleado el método de implementación directa tal y como se indica a continuación:

$$\delta_{T,ref} = k_p(e_k + \frac{T}{T_i} I_k) \quad (17)$$

Siendo $\delta_{T,ref}$ la posición de palanca de referencia e I_k el valor del término integral que se calcula como se indica en la siguiente expresión:

$$I_k = I_{k-1} + e_k \quad (18)$$

Además, para un mejor ajuste y relajar el trabajo del integrador se ha calculado una función de trimado tal que para cada velocidad de referencia se obtiene una posición de palanca determinada.

$$\delta_{T,trim} = 5 \cdot 10^{-5} TAS_{ref}^2 - 0.0061 \cdot TAS_{ref} + 0.89 \quad (19)$$

Estos coeficientes también se han calculado ajustando los valores obtenidos en simulaciones de vuelo en crucero para diferentes velocidades.

Control de TAS con cabeceo

Con el objetivo de controlar la velocidad de descenso en la última fase del aterrizaje se ha implementado este controlador que recibe la consigna de velocidad aerodinámica y establece un cabeceo que permite alcanzar esa referencia. Se ha implementado un PI con el método de implementación directa:

$$\theta_{ref} = \theta_{trim} + k_p(e_k + \frac{T}{T_i} I_k) \quad (20)$$

siendo I_k el valor del término integral que se calcula como se indica a continuación: $I_k = I_{k-1} + e_k$ y θ_{trim} es el valor del cabeceo de trimado para cada velocidad de referencia con un valor de *throttle* de 0.1.

$$\theta_{trim} = -0.001 TAS_{ref}^2 - 0.05 TAS_{ref} + 7.5 \quad (21)$$

4.2 Controlador de bajo nivel

En esta sección se tratará el control de bajo nivel que es el encargado de controlar las consignas de alabeo y cabeceo.

4.2.1 Controlador de cabeceo

El controlador de cabeceo recibe las consignas del control de altitud o del control de velocidad aerodinámica. Cuando el modo de vuelo es aterrizaje se utiliza este último mientras que cuando se vuela en crucero se reciben las consignas del control de altitud. Para controlar el cabeceo se ha implementado un PI con el método de implementación directa:

$$\delta_e = k_p(e_k + \frac{T}{T_i} I_k) \quad (22)$$

siendo I_k el valor del término integral que se calcula como se indica a continuación: $I_k = I_{k-1} + e_k$

4.2.2 Controlador de alabeo

El controlador de roll recibe la señal de referencia del bloque de control de curso. Para controlarlo también se ha empleado un PI con el método de implementación directa:

$$\delta_a = k_p(e_k + \frac{T}{T_i} I_k) \quad (23)$$

siendo I_k el valor del término integral que se calcula como se indica a continuación: $I_k = I_{k-1} + e_k$

5 RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Es esta sección se incluyen y comentan los resultados de la simulación durante el aterrizaje de la Cessna 172P en el aeropuerto de Sevilla. Hay que tener en cuenta, que FlighGear tiene un modelo del contacto con el terreno, por lo tanto es necesario realizar la toma de contacto lo suficientemente suave como para que la aeronave permanezca intacta. Con la trayectoria implementada se consigue que la avioneta aterrice correctamente y sin sufrir daños.

En la figura 6 se muestra el seguimiento de la referencia de velocidad aerodinámica (*True Airspeed*,

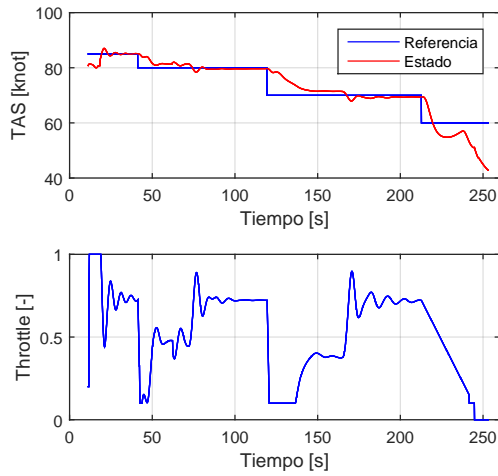


Figura 6: Seguimiento de la referencia de velocidad durante el aterrizaje

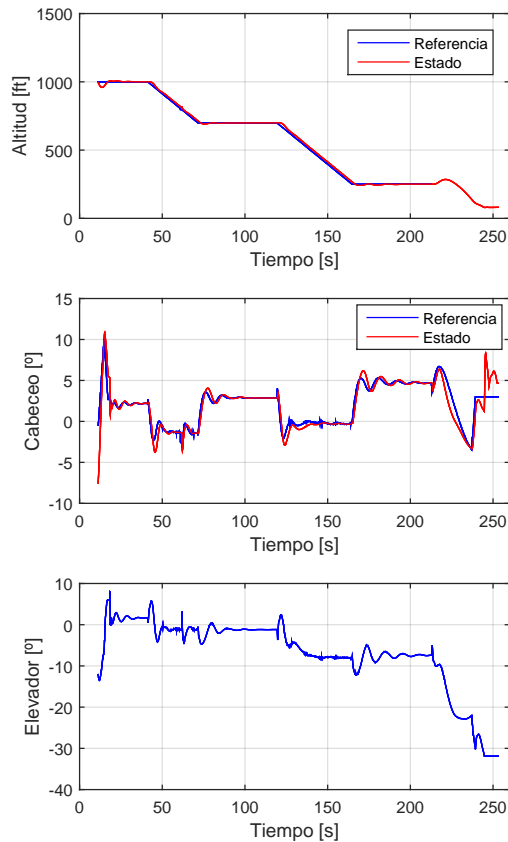


Figura 7: Seguimiento de la referencia de altitud durante el aterrizaje

TAS). Se observa que el seguimiento de la velocidad es adecuado, con sobreoscilaciones del orden de $2 \text{ knot} \equiv 3.7 \text{ km/h}$, que se van atenuando a medida que el sistema alcanza el régimen permanente. Cabe destacar que el cuarto tramo de la referencia en velocidad no se sigue con la variación de la posición de palanca si no con la variación del

cabeceo. En efecto, en la figura 7 se observa que no existe referencia de altitud en este tramo temporal.

Con respecto al control de la altitud, el seguimiento es muy satisfactorio con sobreoscilaciones de tan solo $8 \text{ ft} \equiv 2.5 \text{ m}$.

El control del curso (ver figura 8) también se sigue de forma suave, aunque se observan ciertas oscilaciones, cuyo origen se debe a la dinámica del sistema. En efecto, en avionetas con un solo motor de hélice en el morro, la dinámica lateral está acoplada con la dinámica longitudinal, concretamente los cambios de posición de palanca provocan un alabeo. Esto es debido a la resistencia aerodinámica de la hélice, que aumenta al aumentar la velocidad de la misma. Esta resistencia provoca un momento que es transmitido al fuselaje, resultando en un alabeo.

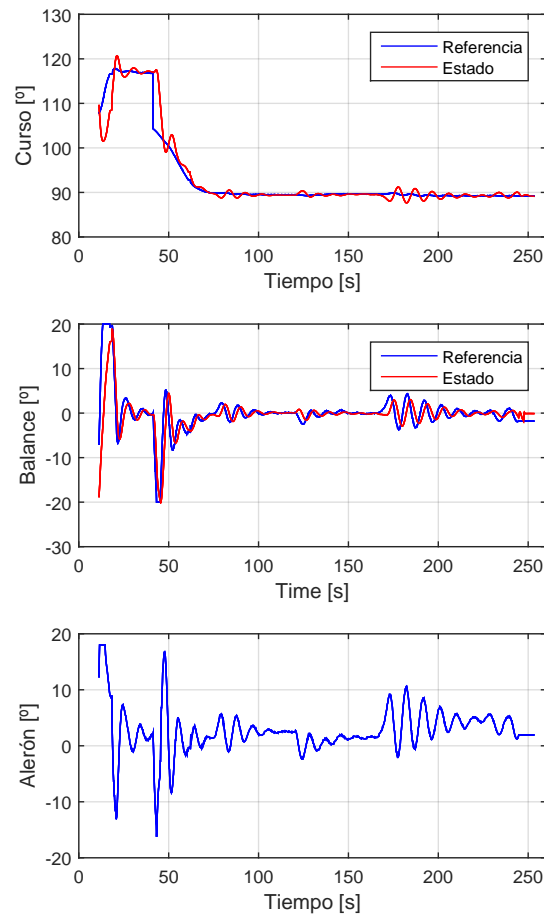


Figura 8: Seguimiento de la referencia de curso durante el aterrizaje

6 CONCLUSIONES

En este artículo se ha implementado la maniobra de aterrizaje para la avioneta Cessna 172P con un controlador PID y un modelo dinámico de FlightGear.

Con respecto al uso del modelo de FlightGear se puede decir que aporta claras ventajas frente al desarrollo del modelo matemático. Además de que se trata de un simulador consolidado y que aporta buenos resultados, con su uso se evita tener que calcular los parámetros aerodinámicos y propulsivos. Por otra parte, una gran ventaja consiste en poder cambiar fácilmente el modelo de la aeronave, lo cual permite comprobar la flexibilidad del control diseñado. Además se puede verificar la robustez del mismo incluyendo viento en la simulación.

El controlador PID ha mostrado buenos resultados teniendo en cuenta la simplicidad de esta metodología de control. Además, el hecho de no conocer los parámetros de la aeronave en cuestión, hace que este controlador sea un muy buen candidato para el problema planteado. En las simulaciones se observa que para futuras revisiones del control convendría incluir en el controlador el acoplamiento existente entre el balance y la posición de palanca del motor.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la junta de Andalucía y al Ministerio de Educación por financiar el trabajo mediante el proyecto Control Predictivo de Microrredes Reconfigurables con Almacenamiento Híbrido y Móvil (DPI2016-78338-R).

Referencias

- [1] Aschauer, G., Schirrer, A., Kozek, M., (2015) Co-Simulation of Matlab and FlightGear for Identification and Control of Aircraft, International Federation of Automatic Control (IFAC), pp. 067-072.
- [2] Boeing, (2015). Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents. Worldwide Operations — 1959-2015.
- [3] Çetin, E., Kutay, A. T., (2016) Automatic landing flare control design by model-following control and flight test on X-Plane Flight Simulator, International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE), pp. 416-420.
- [4] ENAIRE, (2017) Cartas de aproximación de los aeródromos españoles: <http://www.enaire.es/csee/>

Satellite/navegacion-aerea/es/Page/1078418725163/?other=1083158950596&other2=1083857760137#ancla350

- [5] Lungu, M., Lungu, R., Tutunea, D., (2016) Control of Aircraft Landing using the Dynamic Inversion and the H-inf Control, IEEE. 17th International Carpathian Control Conference (ICCC), pp. 461-466.
- [6] Nelson, D. R., Barver, D. B., McLain, T. W., and Beard, R. W., (2007) Vector field path following for miniature air vehicles, IEE Trans. Robot, vol. 23, no. 3, pp. 519-529.
- [7] Robert M. Rogers, (2003) Applied mathematics in integrated navigation systems, second edition.
- [8] Stevens, B. L., Lewis, F. L., Johnson, E. N., (2016) Aircraft Control and Simulation, Third Edition, Wiley.
- [9] S. Berndt, Jon, & the JSBSim Development Team, (2011) JSBSim Reference Manual. <http://jsbsim.sourceforge.net/JSBSimReferenceManual.pdf>

Alternativas para el control de la red eléctrica aislada en parques eólicos marinos

Carlos Díaz-Sanahuja, Ignacio Peñarrocha, Ricardo Vidal-Albalade, Ester Sales-Setién
Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño
Universitat Jaume I, Castellón, España
{csanahuj,ipenarro,rvidal,esales}@uji.es

Resumen

En este trabajo se presenta el problema de control de la red eléctrica de parques eólicos marinos que vierten su potencia a la red eléctrica terrestre a través de un enlace de corriente continua y convertidores por fuente de tensión. A día de hoy, el problema se resuelve mediante un control similar al de las redes eléctricas convencionales, en las que la frecuencia es una variable libre que deben controlar los generadores convencionales con gran inercia. Teniendo en cuenta que en las redes eléctricas marinas las conexiones se realizan mediante convertidores de electrónica de potencia AC/DC y DC/AC, se plantea una nueva estrategia en la que la frecuencia deja de ser un grado de libertad y se demuestra que, de esta forma, el sistema a controlar es lineal. Con esta propuesta, se pueden desarrollar controladores más robustos que los existentes hasta la fecha y se le pueden pedir mayores prestaciones a los parques eólicos.

Palabras clave: Parque eólico marino, control de redes eléctricas, corriente continua de alta tensión (HVDC), convertidor por fuente de tensión (VSC).

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha habido una gran expansión de los parques eólicos marinos. De acuerdo con la Asociación Europea para la Energía Eólica (EWEA), en 15 años la potencia instalada en parques eólicos marinos superará la instalada en los terrestres [2, 4].

Para conectar cada parque eólico con la red eléctrica terrestre se utilizan enlaces de corriente continua de alta tensión (HVDC), ya que, para largas distancias, éstos son más adecuados que los enlaces de corriente alterna (HVAC) [10]. Además, se prevé que esta tecnología se use en el futuro en la *European Super Grid*, en la que se conectarán parques eólicos mediante redes HVDC multiterminal [12]. Como se explica en [6, 7], el uso de sistemas de transmisión con convertidores por fuente de tensión (VSC), que incluye convertidores modulares multinivel en ambos terminales

de la red, está incrementándose sobre el uso de convertidores de línea conmutada (LCC) gracias a las importantes ventajas en lo que respecta a sus capacidades de control y prestaciones.

Esta mayor controlabilidad es importante para desarrollar la mejor estrategia de control para el parque eólico y así responder a los nuevos requerimientos impuestos para este tipo de sistemas. En este sentido, el código de red para conexión de generadores publicado por ENTSO-E [11], establece diferentes requerimientos para las prestaciones de los generadores eólicos. Algunos de estos requerimientos son: apoyo al control de la frecuencia, apoyo al control de la tensión, sin fuentes de energía externa, funcionamiento en isla, capacidad de recuperación ante fallos de la red o control de los flujos de potencia. Por tanto, todos los generadores, incluyendo las fuentes de energía renovable, deben tener suficiente robustez para hacer frente a las perturbaciones de la red y facilitar la restauración del sistema tras un colapso. En este sentido, el uso de convertidores LCC y de estrategias de control convencionales dificulta el cumplimiento de estos requerimientos, por lo que es necesario desarrollar nuevas estrategias de control para parques eólicos marinos que permitan mejorar la integración de las fuentes de energía renovables en el sistema eléctrico.

Este trabajo se centra en el control de la red eléctrica marina existente entre los aerogeneradores y el rectificador VSC, presentando las técnicas básicas de control existentes hasta la fecha y planteando una alternativa a las mismas. En las técnicas de control convencionales, como las presentadas en [3, 5, 8, 14], la frecuencia de la red eléctrica es una variable a controlar que hace que el sistema sea no lineal. Para el control de las mismas se utiliza una linealización y desacoplamiento por realimentación que tiene problemas de robustez frente a las incertidumbres de los parámetros eléctricos disponibles y los ruidos de las mediciones, además de una elevada complejidad en la implementación. Para solventar este problema, en este trabajo se plantea una nueva estrategia de control en la que la frecuencia deja de ser una variable a controlar. Con esto, se consigue

un sistema lineal sobre el que se pueden aplicar controladores más avanzados con los que tratar de cumplir los requerimientos planteados por la ENTSO-E.

Este trabajo se organiza como sigue. Primero, en la Sección 2, se plantea el problema; así, se presenta la red eléctrica marina y el modelado de la parte que es objeto de estudio. En la Sección 3, se explica la solución convencionalmente adoptada desde el punto de vista de la ingeniería de control. También se incluye el control alternativo propuesto en este trabajo. Finalmente, en la Sección 4, se resumen las principales conclusiones del trabajo.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Esquema y control de un parque eólico marino

La Figura 1 muestra un modelo completo de la red eléctrica de un parque eólico, desde los aerogeneradores hasta la red AC terrestre. El sistema se puede dividir en cuatro subsistemas. Primero, se tiene el aerogenerador, que incluye un rectificador (Back-End) y se conecta a un bus de continua. Segundo, se tiene el sistema integrado por las ramas que agregan las turbinas eólicas. Este subsistema se compone de cada inversor (Front-End), que genera una tensión alterna con un valor eficaz de línea del orden de 2 kV, y por un transformador que eleva la tensión hasta la tensión de la red común AC, del orden de 33kV. El número de sistemas de este tipo depende del número de agregaciones de turbinas eólicas. Las diferentes ramas se conectan entre sí a través del punto de conexión común (PCC). Tercero, se tiene el sistema existente entre el PCC y el rectificador VSC se compone de un condensador, un transformador que eleva de nuevo la tensión hasta unos 150 kV, y el rectificador VSC para convertir las corrientes AC en DC con una tensión de ± 150 kV. Finalmente, se tiene el inversor terrestre que convierte las tensiones de DC en AC y un transformador que eleva las tensiones para acomodarlas y poderse así conectarse con la red terrestre AC.

La presencia de las fuentes VSC (rectificador e inversor) en los dos terminales de un enlace de corriente continua y de los inversores Front-End de los aerogeneradores ofrece diferentes posibilidades de control sobre el sistema completo. En todos los inversores o fuentes mencionados el funcionamiento es tal que se puede manipular de forma directa la tensión que se genera en bornes del terminal de alterna, con lo que las acciones de control finales del sistema son las tensiones V_{W_i} ($i = 1, \dots, n$),

$V_{R_{ac}}$ y $V_{I_{ac}}$ mostradas en la Figura 1. Las variables a controlar en el sistema completo son: la tensión y la frecuencia de la red marina AC existente entre los transformadores; las potencias activas vertidas desde el parque a la red terrestre a través del enlace HVDC; la tensión HVDC del enlace de conexión con tierra. Por una parte, los aerogeneradores pueden dedicarse bien a controlar la potencia que generan, o bien a crear la red eléctrica marina. El rectificador marino puede usarse bien para crear la red eléctrica marina AC, bien para controlar la potencia vertida desde el parque en su conjunto, o bien para controlar la tensión del enlace HVDC. Por su parte, el inversor terrestre puede utilizarse bien para controlar la tensión del enlace HVDC, o bien para controlar las potencias que se inyectan desde el parque a la red eléctrica AC terrestre, contribuyendo a su vez al control de la tensión y de la frecuencia de la red convencional terrestre AC. Finalmente, los convertidores pueden dedicarse al control de la misma variable eléctrica y trabajar de forma coordinada. Este trabajo se centra en el control de los dos primeros subsistemas, i.e., los aerogeneradores y el rectificador marino.

2.2 Variables y objetivos de control de la red eléctrica marina AC

El equivalente monofásico de la red marina AC es el que se muestra en la Figura 2. Las tensiones mostradas como V_i corresponden a las tensiones generadas por cada convertidor Front-End vistas desde el lado de alterna (es decir, $V_i = r_{t_i} V_{W_i}$, con $r_{t_i} \approx \frac{33}{2}$), mientras que las corrientes I_i representan las corrientes entregadas el por generador a la red común ($I_i = r_{t_i}^{-1} I_{W_i}$). Las impedancias R_i y L_i representan el circuito equivalente del transformador y el cable desde el aerogenerador hasta el punto de conexión común. La corriente I_F representa la corriente suma entregada por todas las ramas, mientras que V_F representa la tensión del PCC, que se ha de controlar. De forma similar, la tensión V_R representa la tensión generada por el rectificador marino vista desde el lado de la red de alterna, esto es, $V_R = r_t^{-1} V_{R_{ac}}$, con $r_t \approx \frac{150}{33}$, y lo mismo ocurre con la corriente I_R ($I_R = r_t I_{R_{ac}}$). Finalmente, I_C denota la corriente que se va por el condensador de compensación de reactiva C .

En el circuito monofásico anterior, las nuevas acciones de control son las tensiones V_i y V_R . Una vez calculadas estas acciones de control, se calcularán las acciones de control requeridas por el convertidor (i.e., V_{W_i} y $V_{R_{ac}}$) simplemente aplicando la relación de transformación pertinente para pasarlas a los niveles de tensión correspondientes.

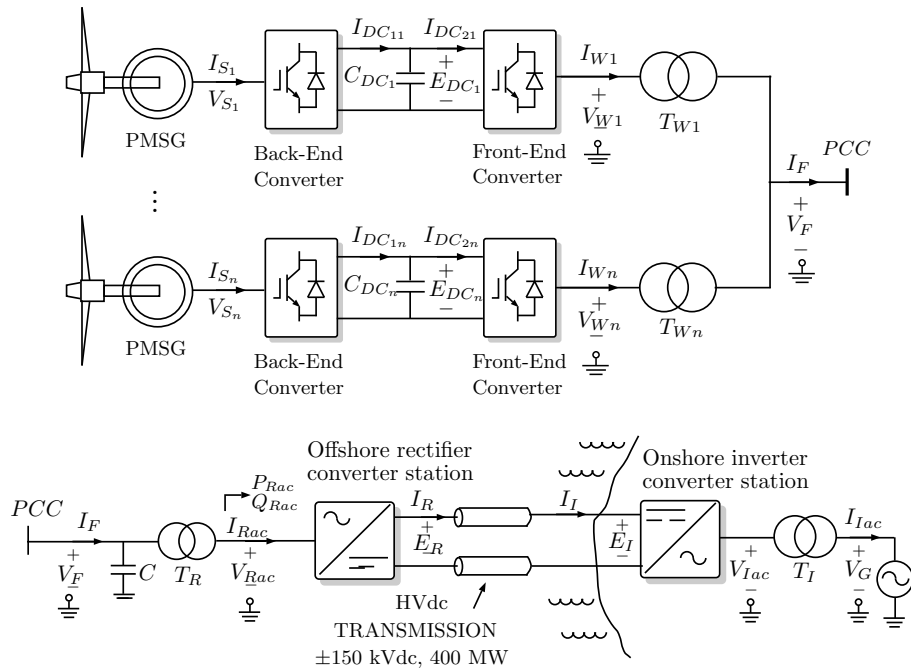


Figura 1: Esquema eléctrico de un parque eólico marino.

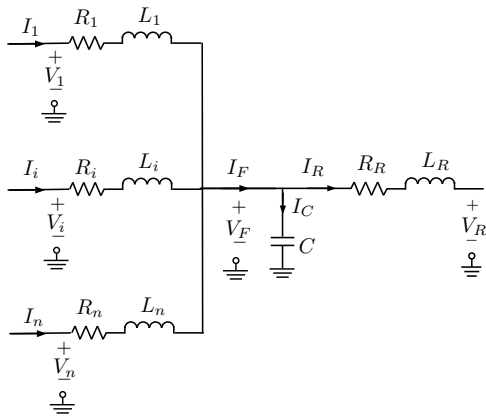


Figura 2: Circuito monofásico equivalente.

Los objetivos de control en la red marina son mantener cierta tensión V_F y proporcionar cierta potencia hacia el enlace HVDC. Para controlar la red marina existen dos posibilidades [3].

En primer lugar, se puede utilizar la tensión V_R para controlar la tensión V_F , y las tensiones V_i para controlar las potencias generadas en cada molino. Las potencias de referencia de cada aerogenerador pueden venir, bien del seguimiento del punto de máxima potencia disponible en función del viento incidente, bien de una consigna de potencia a generar por el parque más un sistema de reparto de potencias a lo largo de las máquinas del parque. Para proceder de esta forma, es necesario

que exista tensión en el enlace HVDC, que debería venir fijada por el inversor terrestre.

En segundo lugar, se puede utilizar la tensión V_R para controlar la potencia vertida por el parque eólico en su conjunto, y utilizar las tensiones V_i para controlar la tensión V_F de la red marina de forma coordinada. En este caso se puede energizar la red marina a partir de las turbinas con lo que, de esta forma, se puede funcionar de forma aislada de la red terrestre. Sin embargo, esta estrategia de control presenta la necesidad de coordinar los controladores de la tensión V_F , ya que todas las tensiones V_i (y los controladores que deciden dichas tensiones) buscan el mismo objetivo, lo cual cambia la dinámica del sistema en función de cuántos aerogeneradores haya en funcionamiento en cada momento, pudiendo incluso inestabilizar la red si el diseño no se hace de forma adecuada. Este problema todavía está abierto y es uno de los requerimientos del código ENTSO-E.

Este trabajo se centra en la primera posibilidad de control, donde la red marina se genera mediante la manipulación de V_R , y las tensiones V_i se manipulan para proporcionar la potencia requerida.

2.3 Modelado matemático de la red

Las ecuaciones diferenciales que modelan el comportamiento del sistema son

$$\dot{I}_i = \frac{-R_i}{L_i} I_i + \frac{1}{L_i} (V_i - V_F), \quad i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

$$\dot{V}_F = \frac{1}{C} I_C, \quad (2)$$

$$I_R = I_F - I_C, \quad I_F = \sum_{i=1}^n I_i, \quad (3)$$

$$\dot{I}_R = \frac{-R_R}{L_R} I_R + \frac{1}{L_R} (V_F - V_R), \quad (4)$$

donde cada ecuación se debe entender como un conjunto de tres ecuaciones iguales en las que se representan las tres fases del sistema, incluyendo el valor de la variable correspondiente en la fase correspondiente. Para el control del sistema, se toman las siguientes consideraciones: desde el punto de vista de los aerogeneradores, la tensión V_F se considera una perturbación que va a estar bajo control y va a tener pocas variaciones; desde el punto de vista del rectificador, la corriente I_F se considera una perturbación que va poderse medir y, además, va a tener pocas variaciones por estar bajo control gracias al control sobre I_i que se va a realizar en cada aerogenerador. Con esto, para el diseño de controladores, se divide el sistema entre el subsistema de los aerogeneradores, dado por la ecuación (1) y por el subsistema rectificador definido como (2)-(3) y (4).

Como se quiere controlar los valores eficaces de las tensiones y las potencias medias, no las instantáneas, es interesante transformar el modelo anterior de tres ecuaciones por variable eléctrica (i.e., una ecuación por fase) en un modelo que trabaje con los valores eficaces de las variables. De esta manera, las potencias activas y reactivas se pueden calcular con productos sencillos de tensión y corriente eficaces. Para este fin existen las transformaciones de Clarke y Park, [1]. La transformación de Clarke seguida de una transformación de coordenadas rectangulares a polares permite extraer la amplitud y el ángulo de una señal trifásica senoidal, y, en general, se denotará como $(\bar{X}, \theta) = C(X_a, X_b, X_c)$. Si esta transformación sólo se aplica a la tensión V_F se tiene un ángulo con el que las señales senoidales a generar deben sincronizarse; a su vez, su derivada proporciona la frecuencia ω de la señal de referencia. La transformación de Clarke-Park permite reducir la representación trifásica de las variables eléctricas a una representación de otras dos variables que, en general, se denotará como $(X_d, X_q) = P(X_a, X_b, X_c, \theta)$ y está referida al ángulo común a todo el circuito θ (extraído de V_F). En esta transformación, la primera variable

representa los valores eficaces (raíz cuadrada del valor cuadrático medio) de tensión o corriente en fase con el ángulo θ (valores en el eje directo, con subíndice d). La segunda, los valores desfasados 90° respecto de la señal anterior (en cuadratura, con subíndice q).

Aplicando la transformación Clarke-Park, el conjunto de tres ecuaciones (una por fase) en (1) se traducen en

$$\dot{I}_{id} = \frac{-R_i}{L_i} I_{id} - \omega I_{iq} + \frac{1}{L_i} V_{id} - \frac{1}{L_i} V_{Fd}, \quad (5)$$

$$\dot{I}_{iq} = \omega I_{id} - \frac{R_i}{L_i} I_{iq} + \frac{1}{L_i} V_{iq} + \frac{1}{L_i} V_{Fq}; \quad (6)$$

mientras que las ecuaciones en (2)-(3) y (4) se traducen en

$$\dot{V}_{Fd} = \omega V_{Fq} - \frac{1}{C} I_{Rd} + \frac{1}{C} I_{Fd}, \quad (7)$$

$$\dot{V}_{Fq} = -\omega V_{Fd} - \frac{1}{C} I_{Rq} + \frac{1}{C} I_{Fq}, \quad (8)$$

$$\dot{I}_{Rd} = \frac{1}{L_R} V_{Fd} - \frac{R_R}{L_R} I_{Rd} - \omega I_{Rq} - \frac{1}{L_R} V_{Rd}, \quad (9)$$

$$\dot{I}_{Rq} = \frac{1}{L_R} V_{Fq} + \omega I_{Rd} - \frac{R_R}{L_R} I_{Rq} - \frac{1}{L_R} V_{Rq}. \quad (10)$$

Con esta notación, la potencia generada en bornes del inversor Front-End viene dada por

$$\begin{bmatrix} P_i \\ Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{id} & V_{iq} \\ V_{iq} & -V_{id} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{id} \\ I_{iq} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

siendo P la potencia activa y Q la potencia reactiva. Teniendo en cuenta las pérdidas en el transformador, la potencia efectiva que se vierte finalmente a la red vienen dada por

$$\begin{bmatrix} P_i \\ Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Fd} & V_{Fq} \\ V_{Fq} & -V_{Fd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{id} \\ I_{iq} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

3 PROPUESTAS DE CONTROL DE LA RED MARINA

Con esta transformación, las nuevas acciones de control en los convertidores que generan las señales trifásicas V_i y V_R son sus valores d y q así como el ángulo θ . La utilización de estas nuevas variables es común debido al control vectorial interno en los inversores, que requieren dichas variables para su funcionamiento normal (el inversor se encarga internamente de generar las tensiones senoidales trifásicas a partir de los valores eficaces y del ángulo resultante de integrar la variable de frecuencia). Para crear una red AC sólo es necesario definir dos variables eléctricas sobre V_F , o bien la valor eficaz de la tensión y la frecuencia ω , manteniendo la componente q de la tensión arbitrariamente a cero ($V_{Fq} = 0$), o bien la tensión en el eje

d y en el q , manteniendo fija la frecuencia en un valor determinado ($\omega = \omega^*$). De igual forma, para definir el flujo de potencia, también es únicamente necesario definir dos variables, la potencia activa y la reactiva. A la vista de este comportamiento, cada convertidor tiene una variable de holgura.

3.1 Control convencional de la tensión de la red marina

En el control tradicional, el rectificador VSC controla la tensión y frecuencia de la red marina en bucle abierto, esto es, pasándose la referencia de estas magnitudes eléctricas de forma directa a V_R y con un ángulo obtenido simplemente por integración de la frecuencia deseada [9, 13]. Sin embargo, no se tiene un control sobre las corrientes, lo que puede llegar a dañar el convertidor ante un mal funcionamiento o perturbación. Ante esta falta de control interno de las corrientes, ante sobrecorriente únicamente proponen apagar el convertidor.

Una alternativa para solucionar este problema es la siguiente, que se basa en una imitación en el parque eólico del control que se lleva a cabo en los sistemas de generación convencional. En estos, generalmente, existe una turbina con gran inercia que es la encargada de generar la frecuencia de la red eléctrica (50 Hz en Europa), siendo esta proporcional a la velocidad de giro del generador. Por este motivo, la mayoría de controles existentes hasta la fecha se basan en este funcionamiento, dejando libre la variable de la frecuencia, y fijan, de forma arbitraria, la tensión en el eje q de la red AC a cero $V_{Fq} = 0$. Con esto, se tiene un sistema no lineal dado por las ecuaciones

$$\dot{I}_{id} = \frac{-R_i}{L_i} I_{id} - \omega I_{iq} + \frac{1}{L_i} V_{id} - \frac{1}{L_i} V_{Fd}, \quad (13)$$

$$\dot{I}_{iq} = \omega I_{id} - \frac{R_i}{L_i} I_{iq} + \frac{1}{L_i} V_{iq}, \quad (14)$$

para el aerogenerador, y

$$\dot{V}_{Fd} = -\frac{1}{C} I_{Rd} + \frac{1}{C} I_{Fd}, \quad (15)$$

$$\dot{I}_{Rd} = \frac{1}{L_R} V_{Fd} - \frac{R_R}{L_R} I_{Rd} - \omega I_{Rq} - \frac{1}{L_R} V_{Rd}, \quad (16)$$

$$\dot{I}_{Rq} = \omega I_{Rd} - \frac{R_R}{L_R} I_{Rq} - \frac{1}{L_R} V_{Rq}, \quad (17)$$

$$\omega = \frac{1}{V_{Fd}} \left(-\frac{1}{C} I_{Rq} + \frac{1}{C} I_{Fq} \right), \quad (18)$$

para el rectificador. En este último sistema de ecuaciones se debe entender la frecuencia como una salida del sistema que viene dada por su medición a través de la señal V_F . Así, para obtener un sistema en representación interna (donde la derivada de cada variable de estado sólo depende

de variables de estado y entradas), se debe sustituir el valor de ω dado por (18) en las ecuaciones anteriores. Para la generación de las tensiones del rectificador V_R , se debe utilizar el ángulo obtenido a partir de la tensión V_F .

Para el control de la red marina se asume que la tensión V_F es medible, lo que permite obtener, mediante la transformación D , el ángulo θ y la frecuencia ω resultante. También se consideran medibles las corrientes I_R y la corriente I_F . Se utiliza una estrategia de control por linealización y prealimentación que, simultáneamente, permite obtener un sistema lineal desacoplado. Así, las acciones de de control se definen como

$$V_{Rd} = -u_d + \hat{V}_{Fd} + \hat{\omega} \hat{L}_R \hat{I}_{Rq}, \quad (19)$$

$$V_{Rq} = -u_q - \hat{\omega} \hat{L}_R \hat{I}_{Rd}, \quad (20)$$

donde se ha utilizado el símbolo $\hat{\cdot}$ sobre las variables que son, o bien medibles, o bien un parámetro del sistema disponible, y donde se han introducido las nuevas acciones de control virtuales u_d y u_q . Si las mediciones fueran perfectas y no existiera error en el modelo, la dinámica del sistema se reduciría a

$$\dot{V}_{Fd} = \frac{-1}{C} I_{Rd} + \frac{1}{C} I_{Fd}, \quad (21)$$

$$\dot{I}_{Rd} = \frac{-R_R}{L_R} I_{Rd} + \frac{1}{L_R} u_d, \quad (22)$$

$$\dot{I}_{Rq} = \frac{-R_R}{L_R} I_{Rq} + \frac{1}{L_R} u_q, \quad (23)$$

$$\omega = \frac{1}{V_{Fd}} \left(-\frac{1}{C} I_{Rq} + \frac{1}{C} I_{Fq} \right). \quad (24)$$

Nótese que se tiene un sistema desacoplado donde I_{Rd} sólo depende de u_d y I_{Rq} sólo depende de u_q , mientras que las variables a controlar son la tensión V_{Fd} y la frecuencia ω . Asimismo, es interesante mantener la corriente I_R limitada durante los transitorios para evitar sobrepasar la potencia máxima del rectificador. Por este motivo, se opta por un control en cascada en el que u_d y u_q se utilizan para el control de las corrientes I_{Rd} y I_{Rq} , y en el que se utilizan las corrientes de referencia I_{Rd}^* y I_{Rq}^* para controlar la tensión V_{Fd} y ω . El control de corriente se realiza mediante un control PID de la forma

$$u_d = PID(I_{Rd}^*, \hat{I}_{Rd}), \quad (25)$$

que se diseña teniendo en cuenta únicamente el polo ubicado en $\frac{-R_R}{L_R}$. De forma similar, se realiza y diseña el control de I_{Rq} mediante la acción de control virtual u_q

$$u_q = PID(I_{Rq}^*, \hat{I}_{Rq}). \quad (26)$$

Para el control de la tensión V_{Fd} se tiene un sistema en el que la tensión sólo depende de la corriente controlada I_{Rd} y de la corriente I_{Fd} , considerada una perturbación medible. Entonces, se

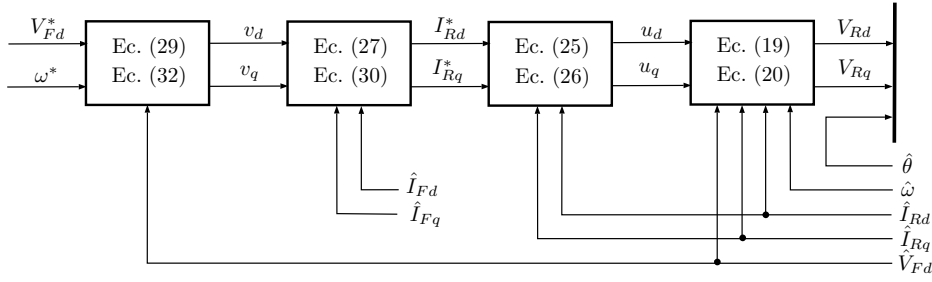


Figura 3: Esquema del control convencional.

propone definir la acción de control del control maestro de tensión como

$$I_{Rd}^* = \max\{-v_d + \hat{I}_{Fd}, I_{Rd,\max}\}, \quad (27)$$

donde se ha aplicado una saturación para evitar corrientes elevadas y se ha introducido la nueva acción de control virtual v_d . Si se asume que el control de corriente es suficientemente rápido (i.e., $I_{Rd} \approx I_{Rd}^*$) y que no se tiene error de medición, la ecuación de la dinámica de la tensión de la red marina es

$$\dot{V}_{Fd} = \frac{1}{C} v_d. \quad (28)$$

Teniendo en cuenta esta ecuación, se define un controlador de tipo PID como

$$v_d = PID(V_{Fd}^*, \hat{V}_{Fd}). \quad (29)$$

Para el control de la frecuencia ω , se tiene un sistema que depende de forma estática de la corriente controlada I_{Rq} así como de la corriente I_{Fd} , considerada una perturbación medible. Se propone definir la acción de control del control maestro de frecuencia como

$$I_{Rq}^* = \max\{-v_q + \hat{I}_{Fq}, I_{Rq,\max}\}, \quad (30)$$

donde se ha introducido la nueva acción de control virtual v_{Rq} . Bajo el supuesto $I_{Rq} \approx I_{Rq}^*$ y error de medición nulo, se tiene que la frecuencia viene dada por la ecuación estática

$$\omega = \frac{1}{V_{Fd}C} v_q. \quad (31)$$

Con esto, se plantea un control estático por inversión para conseguir la frecuencia deseada ω^* que viene dado por

$$v_q = \hat{V}_{Fd} \hat{C} \omega^*. \quad (32)$$

La Figura 3 resume el controlador convencional. Como se puede observar, el funcionamiento de este control convencional depende fuertemente de la bondad de las mediciones y de los parámetros disponibles para su correcto funcionamiento. Esta falta de robustez hace que sea necesaria la búsqueda de técnicas de control alternativas para poder dotar al parque eólico de mayores prestaciones que permitan llevar a cabo los requerimientos marcados por ENTSO-E.

3.2 Control convencional de potencia

La potencia eléctrica vertida a la red por cada turbina eólica, viene dada por

$$\begin{bmatrix} P_i \\ Q_i \end{bmatrix} = V_{Fd} \begin{bmatrix} I_{id} \\ -I_{iq} \end{bmatrix}, \quad (33)$$

ya que, por definición se toma, $V_{Fq} = 0$. Así, para llevar a cabo el control de potencia se implementa un control de corriente como el explicado anteriormente sobre el modelo (5)-(6) y actuando sobre V_i , asumiendo como medibles la tensión del punto común V_{Fd} , la frecuencia ω y el ángulo θ . Esta medición se lleva a cabo junto al transformador del convertidor, con lo que se desprecia el efecto de los conductores que hay desde el transformador al PCC. Con estas mediciones, se calcula la referencia de corriente a seguir como

$$\begin{bmatrix} I_{id}^* \\ I_{iq}^* \end{bmatrix} = \hat{V}_{Fd}^{-1} \begin{bmatrix} P_i^* \\ -Q_i^* \end{bmatrix}. \quad (34)$$

3.3 Propuesta de control de la tensión de la red marina

En este trabajo, bajo la consideración de que no hay ninguna máquina rotativa cuyo giro sea quien proporciona la frecuencia de la red eléctrica, y bajo la consideración de que la red eléctrica sólo tiene conectados elementos de electrónica de potencia, se propone mantener fija la frecuencia en $\omega = \omega^* = 2\pi 50$ y no considerarla una variable como se viene haciendo tradicionalmente. De esta forma, el sistema (7)-(10) es lineal (con $\omega = \omega^*$ constante) y no se requiere que los ángulos de los convertidores tengan que depender de la medición de la tensión del punto común. Además, al tratarse de un sistema lineal, el diseño de los controladores es mucho más sencillo y su implementación no es tan dependiente del ruido de las señales medibles necesarias ni del error paramétrico para la linealización. Una vez fijada la frecuencia, se decide que el sistema de control incluya como referencia $V_{Fq}^* = 0$.

Al igual que en el control convencional, la idea es suponer el funcionamiento de la red en régimen

permanente. Como diferencia, el control propuesto mantiene fija la frecuencia a 50 Hz para todos los convertidores en lugar de considerarla como una variable y considerar la frecuencia como una variable en lugar de fijarla con $V_{Fq} = 0$. Esto lleva a una implementación directa de un control por realimentación del estado (sin necesidad de observador), para el que se le pueden pedir prestaciones mejores que las obtenibles con los controladores PI de la propuesta convencional.

Se plantea pues un control por realimentación del estado con integrador que tiene la forma:

$$e_{V_{Fd}} = \int (V_{Fd}^* - \hat{V}_{Fd}) dt, \quad (35)$$

$$e_{V_{Fq}} = \int (V_{Fq}^* - \hat{V}_{Fq}) dt, \quad (36)$$

$$\begin{bmatrix} V_{Rd} \\ V_{Rq} \end{bmatrix} = -K_{V_F} \begin{bmatrix} \hat{I}_{Rd} \\ \hat{I}_{Rq} \\ \hat{V}_{Fd} \\ \hat{V}_{Fq} \end{bmatrix} + K_{e_{V_F}} \begin{bmatrix} e_{V_{Fd}} \\ e_{V_{Fq}} \end{bmatrix}, \quad (37)$$

con el ángulo obtenido mediante $\theta = \int \omega^* dt$, y se esquematiza en la Figura 4. El controlador se implementa también con un mecanismo de saturación y antiwindup, de forma que cuando el módulo de la tensión $\sqrt{V_d^2 + V_q^2}$ satura, se dejan de integrar los términos de error acumulado e_d y e_q . El diseño de las ganancias de este controlador (K_{V_F} , $+K_{e_{V_F}}$) se puede realizar tanto por asignación de polos como por control óptimo LQR tras extender el modelo del sistema para incluir los integradores.

Con este control se pierde la capacidad de limitar las corrientes del convertidor que se tenía en el control convencional. Para solucionar este problema, se plantea un control de la corriente I_R con corrientes de referencia igual a las máximas permitidas. Finalmente, se aplica la acción de control que menor módulo tenga, es decir, se aplica un control por override para conseguir dicha limitación:

$$e_{I_{Rd}} = \int (I_{Rd,\max} - \hat{I}_{Rd}) dt, \quad (38)$$

$$e_{I_{Rq}} = \int (I_{Rq,\max} - \hat{I}_{Rq}) dt, \quad (39)$$

$$\begin{bmatrix} V_{Rd} \\ V_{Rq} \end{bmatrix} = -K_{I_R} \begin{bmatrix} \hat{I}_{Rd} \\ \hat{I}_{Rq} \\ \hat{V}_{Fd} \\ \hat{V}_{Fq} \end{bmatrix} + K_{e_{I_R}} \begin{bmatrix} e_{I_{Rd}} \\ e_{I_{Rq}} \end{bmatrix}, \quad (40)$$

$$\begin{bmatrix} V_{Rd} \\ V_{Rq} \end{bmatrix} = \arg_{V_R} \min \{ \|(37)\|, \|(40)\| \}. \quad (41)$$

Este control permitiría a su vez que el rectificador funcionara, si así se deseara, como control de potencia de todo el parque.

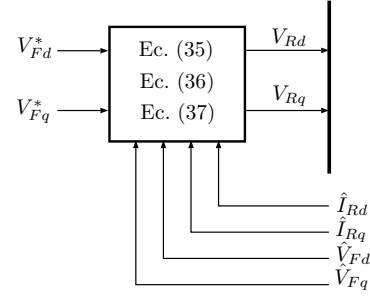


Figura 4: Esquema del control propuesto.

3.4 Propuesta de control de potencia

Para el control de potencia de los aerogeneradores, se utiliza la misma estrategia de alimentar los convertidores con una frecuencia fija $\omega = \omega^*$. Así, se tiene que el sistema (5)-(6) es lineal. Con esto, se implementa un control de corriente por realimentación del estado de forma similar al anterior, donde la tensión V_F se considera una perturbación. El control queda como

$$e_{id} = \int (I_{id}^* - \hat{I}_{id}) dt, \quad (42)$$

$$e_{iq} = \int (I_{iq}^* - \hat{I}_{iq}) dt, \quad (43)$$

$$\begin{bmatrix} V_{id} \\ V_{iq} \end{bmatrix} = -K_i \begin{bmatrix} \hat{I}_{id} \\ \hat{I}_{iq} \end{bmatrix} + K_{ie} \begin{bmatrix} e_{id} \\ e_{iq} \end{bmatrix}, \quad (44)$$

$$\theta = \int \omega^* dt. \quad (45)$$

Para obtener la corriente de referencia a partir de la potencia de referencia se necesita la medición de la tensión del punto común. Como se intenta evitar esta medición, se propone calcular la potencia de referencia utilizando la tensión aplicada V_i . La utilización de esta tensión puede llegar a inestabilizar el lazo dada la dependencia de la referencia a seguir de la propia acción de control que se está aplicando. Para evitar este, se pasa la tensión por un filtro paso bajo y el valor resultante se utiliza en el cálculo de las corrientes. Así, la dinámica del lazo de corriente y del cálculo de la corriente de referencia quedan parcialmente desacopladas. Mediante inversión de la ecuación (11) se tiene

$$\begin{bmatrix} I_{id}^* \\ I_{iq}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_{id} & \bar{V}_{iq} \\ \bar{V}_{iq} & -\bar{V}_{id} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_i^* \\ Q_i^* \end{bmatrix}, \quad (46)$$

con \bar{V}_{id} y \bar{V}_{iq} las tensiones filtradas.

4 CONCLUSION

En este trabajo, se ha planteado una estrategia alternativa de control de la red eléctrica AC de

parques eólicos marinos. En el control de ese tipo de sistemas, se tiene una variable de holgura que se debe fijar de forma independiente. A diferencia de los controles convencionales, que fijan la tensión reactiva en el punto de unión de los aerogeneradores a cero, el control propuesto fija la frecuencia de la red a un valor determinado. La alternativa convencional resulta en un sistema no lineal y, por ello, los controles convencionales se basan principalmente en linealizaciones y desacoplamientos por realimentación combinados con controladores PI. Con la propuesta de este trabajo, se consigue un sistema lineal que permite el diseño de controladores más avanzados y robustos a los errores de medición y de modelado. En este trabajo, se ha propuesto un control por realimentación del estado para el control de tensión de la red y otro para el control de la potencia vertida por los aerogeneradores. El trabajo futuro se centrará en probar el desempeño de estos controladores ante perturbaciones y colapsos de la red.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Universitat Jaume I de Castelló a través del proyecto con referencia P11B2015-42 2 por el Ministerio de Economía y Competitividad a través de los proyectos con referencia TEC2015-69155-R y DPI2014-53245-R. También se ha financiado a través de la ayuda predocctoral FPU14/01592 del MEC.

Referencias

- [1] Paul M Anderson and Aziz A Fouad. *Power system control and stability*. John Wiley & Sons, 2008.
- [2] European Wind Energy Association et al. *Wind energy-the facts: a guide to the technology, economics and future of wind power*. Routledge, 2012.
- [3] Enrique Belenguer, Ricardo Vidal, Héctor Beltrán, and Ramón Blasco-Gimenez. Analysis of control alternatives for offshore wind farms connected through a vsc-hvdc link. In *11th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems As Well As on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants*, 2012.
- [4] Mehmet Bilgili, Abdulkadir Yasar, and Erdogan Simsek. Offshore wind power development in europe and its comparison with onshore counterpart. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2):905–915, 2011.
- [5] Ramon Blasco-Gimenez, Salvador Ano-Villalba, Johel Rodriguez-D’Derlée, Soledad Bernal-Perez, and Francisco Morant. Diode-based hvdc link for the connection of large offshore wind farms. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 26(2):615–626, 2011.
- [6] D Das, J Pan, and S Bala. Hvdc light for large offshore wind farm integration. In *Power Electronics and Machines in Wind Applications (PEMWA), 2012 IEEE*, pages 1–7. IEEE, 2012.
- [7] Oriol Gomis-Bellmunt, Jun Liang, Janaka Ekanayake, Rosemary King, and Nicholas Jenkins. Topologies of multiterminal hvdc-vsc transmission for large offshore wind farms. *Electric Power Systems Research*, 81(2):271–281, 2011.
- [8] Shuhui Li, Timothy A Haskew, and Ling Xu. Control of hvdc light system using conventional and direct current vector control approaches. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(12):3106–3118, 2010.
- [9] SM Mueen, Rion Takahashi, and Junji Tamura. Operation and control of hvdc-connected offshore wind farm. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 1(1):30–37, 2010.
- [10] N Barberis Negra, Jovan Todorovic, and Thomas Ackermann. Loss evaluation of hvac and hvdc transmission solutions for large offshore wind farms. *Electric power systems research*, 76(11):916–927, 2006.
- [11] ENTSO-E Network. Code for requirements for grid connection applicable to all generators. *ENTSO-E: Brussels, Belgium*, 2012.
- [12] Dirk Van Hertem and Mehrdad Ghandhari. Multi-terminal vsc hvdc for the european supergrid: Obstacles. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(9):3156–3163, 2010.
- [13] Ricardo Vidal-Albalade, Hector Beltran, Alejandro Rolán, Enrique Belenguer, Rubén Peña, and Ramon Blasco-Gimenez. Analysis of the performance of mmc under fault conditions in hvdc-based offshore wind farms. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31(2):839–847, 2016.
- [14] Lidong Zhang, Lennart Harnefors, and Hans-Peter Nee. Modeling and control of vsc-hvdc links connected to island systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(2):783–793, 2011.

CONTROL PREDICTIVO DISTRIBUIDO UTILIZANDO MODELOS DIFUSOS PARA LA NEGOCIACIÓN ENTRE AGENTES

L. Fargallo, S. Revollar, M. Francisco, P. Vega, A. Cembellín

Departamento de Informática y Automática. Universidad de Salamanca
luciafargallo@usal.es; srevolla@usal.es; mfs@usal.es; pvega@usal.es; cembe@usal.es

Resumen

En este trabajo se ha desarrollado una técnica de control predictivo distribuido que incluye una negociación basada en lógica borrosa entre los distintos agentes locales que representan a cada subsistema. Se trata de un algoritmo alternativo al de juego cooperativo propuesto en otros trabajos, que utiliza la lógica borrosa para introducir criterios de operación de los procesos en la negociación para determinar la señal de control óptima. Partiendo de un caso en el que cada agente local dispone de varias posibles soluciones de las variables manipuladas, mediante la negociación difusa entre ellos se llega a una solución de compromiso. Cuando el número de agentes es elevado, el sistema difuso propuesto evita la evaluación del coste para cada una de las posibles combinaciones, y además permite introducir criterios económicos u otros de forma cualitativa. La validación de la técnica se ha realizado sobre un modelo del *benchmark* de cuatro tanques acoplados, mostrando un adecuado seguimiento de las referencias y rechazo de perturbaciones.

Palabras Clave: Control predictivo distribuido, juego cooperativo, lógica borrosa, sistema de cuatro tanques acoplados.

1 INTRODUCCIÓN

La industria demanda cada vez más mayor calidad y productividad, optimización de los costes, seguridad y respeto al medio ambiente. Los sistemas de control convencionales que utilizan un control PID solucionan muy bien la mayoría de los problemas de control básico, sin embargo, cuando nos encontramos con problemas más complejos en los que existe interacción se necesitan soluciones más elaboradas y por ello se requiere de sistemas de control avanzados. El control distribuido se presenta como una solución a los problemas complejos a gran escala, al estar formado por varios controladores que controlan individualmente un número de variables, los cuales tienen la capacidad de comunicarse entre ellos al encontrarse interconectados por una red de comunicación (Alvarado et al., 2011; Valencia et al., 2011). Estos controladores son más seguros que los controladores centralizados, ya que estos últimos

concentran todo el problema de control en único elemento (Kouvaritakis y Cannon, 2016). Aunque tradicionalmente se han utilizado controladores PID distribuidos, actualmente se está incluyendo el control predictivo (MPC), ya que es una técnica que aporta eficiencia y flexibilidad y es aplicable además en sistemas multivariables y no lineales. El MPC incorpora un modelo interno del proceso para predecir el comportamiento futuro del proceso, y tiene la ventaja de que se pueden incorporar restricciones de entrada y/o salida en la formulación (Camacho y Bordons, 2004).

Entre las múltiples técnicas de control predictivo distribuido está la de Valencia et al. (2011), Valencia (2012), Alvarado et al. (2011), y Maestre et al. (2011), que plantea un juego cooperativo en el que dos controladores locales diferentes (agentes) se comunican entre sí para obtener la mejor solución para la variable manipulada. Los agentes locales son MPC lineales que proporcionan tres posibles soluciones de la variable manipulada para cada uno de los subsistemas, y mediante la comunicación entre ellos se intercambian esta información, con el fin de llegar a un acuerdo.

En este trabajo se propone una estrategia de control distribuido basándose en Maestre et al. (2011), que incluye un sistema de inferencia difuso (Zadeh, 1974; Yen et al., 1995) en la negociación entre los agentes locales para seleccionar la mejor señal de control en cada periodo de muestreo. Cuando el número de agentes es pequeño, la evaluación del coste de cada una de las posibles combinaciones de variables manipuladas es asumible, pero para un número grande de agentes, el número de combinaciones hace que se deba realizar alguna modificación en el algoritmo. Además, el sistema difuso permite la incorporación de criterios económicos u otros que son difíciles de introducir en el algoritmo del juego cooperativo. Hay que indicar también que en este trabajo se ha estudiado el efecto de las perturbaciones, tanto internas como externas, sobre el caso de estudio elegido.

Para validar la metodología se ha considerado el problema de control de nivel de agua en los dos tanques inferiores de una planta formada por cuatro

tanques acoplados (Johansson, 2000). A pesar de su simplicidad es un sistema muy interesante ya que es un sistema altamente acoplado y con dinámicas complicadas que hacen difícil su control (Mercangöz y Doyle, 2007) En este caso, se evaluó la técnica propuesta frente a cambios de referencia y perturbaciones.

El sistema de inferencia difuso utilizado en el algoritmo propuesto tiene en cuenta la minimización de los costes de bombeo, el cumplimiento de un tiempo de residencia del agua adecuado y la minimización del riesgo de rebose en los tanques superiores como criterios para definir las reglas borrosas.

La estructura del artículo es la siguiente: en la sección 2 se presenta el problema de control distribuido y el algoritmo de juego cooperativo, en la sección 3 se describe la planta y el problema de control a resolver, en la sección 4 se presentan el desarrollo de la estrategia de negociación difusa. Los resultados se presentan en la sección 5 y las conclusiones en la sección 6.

2 MPC DISTRIBUIDO

2.1 CONTROL PREDICTIVO

El Control Predictivo (MPC) es un algoritmo de control que calcula una secuencia temporal discreta de las variables manipuladas sobre un horizonte futuro con el fin de optimizar el comportamiento de un sistema o proceso que se desea controlar. Utilizando un modelo del proceso para predecir las salidas del mismo en un horizonte de predicción N , calcula la secuencia de señales de control mediante la optimización de una cierta función objetivo. Se trata de un algoritmo de horizonte deslizante puesto que el proceso de cálculo se repite en cada instante a medida que se toman nuevas medidas de las variables a controlar. Además, permite tener en cuenta restricciones de operación del proceso (Maciejowski, 2002)

La función de coste o función objetivo es una forma cuadrática que tiene en cuenta tanto los errores de seguimiento en los incrementos de nivel, como los incrementos en la secuencia de control. Depende de las entradas a aplicar en un horizonte. Suponiendo que los horizontes de predicción y control coinciden:

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} \left[(x_{refk} - x_k)^T Q (x_{refk} - x_k) + (u_{refk} - u_k)^T R (u_{refk} - u_k) \right] + x_N^T P x_N \quad (1)$$

Donde x_{refk} es el estado de referencia y u_{refk} son las referencias para la variable manipulada.

Las matrices de sintonía Q y R sirven para penalizar más o menos los errores de seguimiento y los esfuerzos de control (entradas) y se utilizarán como parámetros de ajuste del controlador, del mismo modo que el horizonte de control N . La matriz P se añade como coste terminal para asegurar la estabilidad del controlador

El problema de optimización calcula la secuencia de entradas U que minimice la función de coste (1) sujeta a restricciones sobre las entradas y los estados. Este es un problema de programación cuadrática o QP , en el que la función de coste se puede poner en función de U .

2.3 PLANTEAMIENTO DEL MPC DISTRIBUIDO

En el problema de control distribuido para dos subsistemas acoplados por las entradas, cada agente solo tiene información parcial del modelo y de los estados del sistema, por lo que ambos se deben comunicar para encontrar una solución al problema de optimización que proporciona la señal de control. En general, en estos problemas cada agente resuelve en cada tiempo de muestreo un problema de optimización asumiendo una entrada fija para el otro subsistema.

Los modelos de cada subsistema son:

$$x_1(t+1) = A_1 x_1(t) + B_{11} u_1(t) + B_{12} u_2(t) \quad (2)$$

$$x_2(t+1) = A_2 x_2(t) + B_{22} u_2(t) + B_{21} u_1(t) \quad (3)$$

donde $x \in \mathbb{R}^{n_i}$, $i=1, 2$, son los estados de cada subsistema y $u \in \mathbb{R}^{m_i}$ $i=1, 2$, son las diferentes entradas.

Las variables e índices de interés en el problema de control distribuido son las siguientes:

U_i : variables de decisión en la optimización resuelta por los dos agentes.

$$U_1 = \begin{bmatrix} u_{1,0} \\ u_{1,1} \\ \vdots \\ u_{1,N-1} \end{bmatrix}; U_2 = \begin{bmatrix} u_{2,0} \\ u_{2,1} \\ \vdots \\ u_{2,N-1} \end{bmatrix}$$

n_i : agente vecino del agente i ; es decir $U_{n1}=U_2$ y $U_{n2}=U_1$

J_i : función de coste local del agente i basada en las predicciones de sus estados:

$$J_1(x_1, U_1, U_2) = \sum_{k=0}^{N-1} L_1(x_{1,k}, u_{1,k}) + F_1(x_{1,N}) \quad (4)$$

$$J_2(x_2, U_2, U_1) = \sum_{k=0}^{N-1} L_2(x_{2,k}, u_{2,k}) + F_2(x_{2,N}) \quad (5)$$

donde $L_i(\cdot)$ y $F_i(\cdot)$ con $i = 1, 2$, se definen como sigue, para referencia nula e incluyendo penalización terminal:

$$L_i(x, u) = x^T Q_i x + u^T R_i u \quad (6)$$

$$F_i(x) = x^T P x \quad (7)$$

Con $Q_i, P_i > 0, R_i > 0$ y N el horizonte de predicción.

2.4 MPC DISTRIBUIDO BASADO EN UN JUEGO COOPERATIVO

A continuación, se describe un algoritmo similar al propuesto por J.M. Maestre et al. (2011) basado en un juego cooperativo para resolver el problema de control. Partiremos de este algoritmo a la hora de implementar la coordinación basada en lógica difusa, que sustituirá los pasos 5, 6 y 7 del algoritmo.

Se definen en primer lugar las distintas secuencias de entrada:

$U_i^d(t)$: Secuencia de entrada óptima del agente i en el tiempo t .

$U_i^s(t)$: Secuencia de entrada óptima del agente i desplazada, obtenida a partir de la secuencia óptima de entrada del agente i en el tiempo $t-1$ denotada como $U_i^d(t-1)$

Detalladamente, el algoritmo es el siguiente:

1. En cada instante t , cada agente i recibe del proceso su correspondiente medida del estado parcial $x_i(t)$.
2. Cada agente i minimiza J_i suponiendo que el agente vecino sigue aplicando la trayectoria óptima del paso anterior. El agente 1 resuelve el siguiente problema de optimización:

$$U_1^*(t) = \arg \min_{U_1} J_1(x_1(t), U_1, U_2^s(t)) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} x_{1,k+1} &= A_1 x_{1,k} + B_{11} u_{1,k} + B_{12} u_{2,k} \\ x_{1,0} &= x_1(t) \\ x_{1,k} &\in \mathcal{X}_1, \quad k = 0, \dots, N \\ u_{1,k} &\in \mathcal{U}_1, \quad k = 0, \dots, N-1 \\ x_{1,N} &\in \Omega_1 \end{aligned}$$

Por su parte, el agente 2 resuelve el siguiente problema de optimización:

$$U_2^*(t) = \arg \min_{U_2} J_2(x_2(t), U_2, U_1^s(t)) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} x_{2,k+1} &= A_2 x_{2,k} + B_{22} u_{2,k} + B_{21} u_{1,k} \\ x_{2,0} &= x_2(t) \\ x_{2,k} &\in \mathcal{X}_2, \quad k = 0, \dots, N \\ u_{2,k} &\in \mathcal{U}_2, \quad k = 0, \dots, N-1 \end{aligned}$$

$$x_{2,N} \in \Omega_1$$

En ambos problemas de optimización la variable de decisión es U_i mientras que la trayectoria de entrada vecina U_{ni} es fija.

3. Cada agente i minimiza J_i optimizando la entrada del vecino asumiendo que él aplica la trayectoria de entrada calculada en el problema de optimización anterior $U_i^*(t)$. Es decir, el agente 1 resuelve el siguiente problema de optimización:

$$U_2^w(t) = \arg \min_{U_2} J_1(x_1(t), U_1^*(t), U_2) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} x_{1,k+1} &= A_1 x_{1,k} + B_{11} u_{1,k} + B_{12} u_{2,k} \\ x_{1,0} &= x_1(t) \\ x_{1,k} &\in \mathcal{X}_1, \quad k = 0, \dots, N \\ u_{1,k} &\in \mathcal{U}_1, \quad k = 0, \dots, N-1 \\ x_{1,N} &\in \Omega_1 \end{aligned}$$

y el agente 2 resuelve el siguiente problema:

$$U_1^w(t) = \arg \min_{U_1} J_2(x_2(t), U_2^*(t), U_1) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} x_{2,k+1} &= A_2 x_{2,k} + B_{22} u_{2,k} + B_{21} u_{1,k} \\ x_{2,0} &= x_2(t) \\ x_{2,k} &\in \mathcal{X}_2, \quad k = 0, \dots, N \\ u_{2,k} &\in \mathcal{U}_2, \quad k = 0, \dots, N-1 \\ x_{2,N} &\in \Omega_1 \end{aligned}$$

En este problema de optimización, la variable de decisión es U_{ni} mientras que la trayectoria de entrada U_i es fija.

4. Ambos agentes se comunican. El agente 1 envía $U_1^*(t)$ y $U_2^w(t)$ al agente 2 y recibe $U_2^*(t)$ y $U_1^w(t)$.
5. Cada agente evalúa la función de coste local J_i para cada una de las nueve diferentes combinaciones posibles; eso es $U_1 \in \{U_1^s(t), U_1^w(t), U_1^*(t)\}$ y $U_2 \in \{U_2^s(t), U_2^w(t), U_2^*(t)\}$.
6. Ambos agentes se comunican y comparten la información del valor de la función de costo local para cada posible combinación de trayectorias de entrada. En esta etapa, ambos agentes reciben suficiente información para tomar una decisión cooperativa.
7. Cada agente aplica la trayectoria de entrada que minimiza $J = J_1 + J_2$.
8. Debido a que ambos agentes tienen acceso a la misma información después del segundo ciclo de comunicación, ambos agentes eligen los mismos conjuntos de entrada óptimos. El conjunto elegido de trayectorias de entrada se denota: $U_1^d(t), U_2^d(t)$.
9. Se aplica la primera entrada de cada secuencia óptima y se repite el procedimiento el siguiente periodo de muestreo.

Desde el punto de vista de la teoría de los juegos, en cada periodo de muestreo ambos agentes están jugando un juego cooperativo.

3 SISTEMA DE CUATRO TANQUES ACOPLADOS

3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA Y MODELO MATEMÁTICO

La planta está formada por cuatro depósitos de agua conectados tal y como se indica en la figura 1.

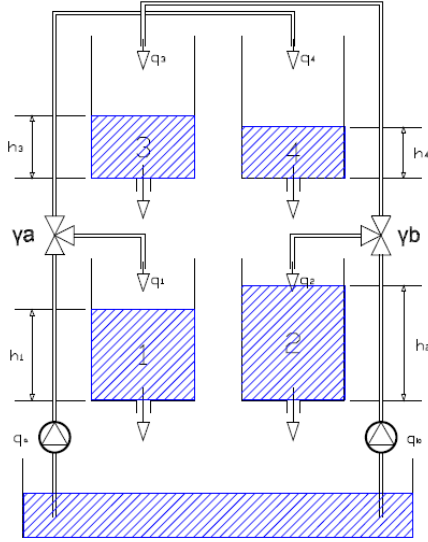


Figura 1: Planta formada por cuatro tanques

Hay dos depósitos inferiores (tanques 1 y 2) y dos superiores (tanques 3 y 4) que desaguan en los tanques inferiores. Los tanques se llenan con dos bombas que proporcionan los caudales q_a y q_b desde un depósito de drenaje situado en la parte más baja de la planta. Estos caudales se dividen en dos ramas, de forma que una fracción γ_a (o γ_b) se envía por una de las ramas y el resto por la otra. Las fracciones γ_a y γ_b se fijan manualmente actuando sobre las válvulas ($\gamma_a = 0.3$, $\gamma_b = 0.4$).

El modelo de la planta se puede obtener mediante balances de masas en cada depósito:

$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{a_1}{S} \sqrt{2gh_1} + \frac{a_3}{S} \sqrt{2gh_3} + \frac{\gamma_1}{S} q_a \quad (12)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = -\frac{a_2}{S} \sqrt{2gh_2} + \frac{a_4}{S} \sqrt{2gh_4} + \frac{\gamma_2}{S} q_b \quad (13)$$

$$\frac{dh_3}{dt} = -\frac{a_3}{S} \sqrt{2gh_3} + \frac{(1-\gamma_2)}{S} q_1 \quad (14)$$

$$\frac{dh_4}{dt} = -\frac{a_4}{S} \sqrt{2gh_4} + \frac{(1-\gamma_1)}{S} q_2 \quad (15)$$

donde la superficie de cada depósito es $S = 0.03 \text{ m}^2$, g es la aceleración de la gravedad. La sección equivalente de los orificios de descarga (a_i) es:

$$a_1 = 1.3104 \times 10^{-4} \text{ m}^2; a_2 = 1.5074 \times 10^{-4} \text{ m}^2; \\ a_3 = 9.2673 \times 10^{-5} \text{ m}^2; a_4 = 8.8164 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

El modelo lineal en tiempo continuo se utiliza como modelo de predicción es el siguiente:

$$\frac{dx}{dt} = A_c x + B_c u \quad (16) \\ y = C_c x$$

donde:

$$A_c = \begin{bmatrix} \frac{-1}{\tau_1} & 0 & \frac{1}{\tau_3} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{\tau_2} & 0 & \frac{1}{\tau_4} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_4} \end{bmatrix} \quad B_c = \begin{bmatrix} \frac{\gamma_a}{S} & 0 \\ 0 & \frac{\gamma_b}{S} \\ 0 & \frac{(1-\gamma_b)}{S} \\ \frac{(1-\gamma_a)}{S} & 0 \end{bmatrix} \\ C_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \tau_i = \frac{S}{a_i} \sqrt{\frac{2h_i^0}{g}}$$

3.2 PROBLEMA DE CONTROL Y CRITERIOS DE COORDINACIÓN

Las variables manipuladas para el sistema de 4 tanques son los caudales proporcionados por las bombas q_a , q_b y las variables controladas en este caso son los niveles de los depósitos inferiores h_1 , h_2 .

El sistema de cuatro tanques interconectados es interesante para la evaluación de estrategias de control distribuido por la interacción entre las variables y por la posibilidad de distinguir claramente subsistemas dentro de la planta. En los trabajos anteriores (Alvarado et al., 2011; Maestre et al., 2011), se han elegido estrategias de control centradas en el seguimiento de referencia y con ciertas consideraciones sobre la economía del proceso asociadas al coste de bombeo. En la implementación que se presenta en este trabajo, se desea aprovechar al máximo las posibilidades de los sistemas difusos de integrar criterios de operación de forma cualitativa. Para ello, se han establecido algunas condiciones de operación para hacer más interesante el problema de control distribuido.

- Se desea minimizar el coste de bombeo (EB), es decir, el coste económico de la energía utilizada para bombear los caudales q_a y q_b a los depósitos.

$$EB = 0.04 * q_a + 0.04 * q_b \text{ [EUR/d]} \quad (17)$$

- Se impone un tiempo de residencia mínimo en los depósitos inferiores

$$T_R = \frac{s \cdot h}{q} \quad (18)$$

Para evaluar este conjunto se compara el tiempo de residencia del tanque 1 (T_{R1}) con el del tanque 2 (T_{R2}) y se escoge el menor que se nombrará como T_R .

- Se define una altura máxima en los tanques superiores. Se considera una penalización económica si las alturas de los depósitos superiores h_3 y h_4 sobrepasa el límite deseado, lo cual es una situación indeseable.

Estas son condiciones hipotéticas que se han establecido para dar mayor complejidad a este caso de estudio, pero son condiciones que podrían existir en sistemas reales, donde se requiera un tiempo de residencia para garantizar la calidad de un producto o el almacenamiento de exceso de producto sea penalizado económicamente.

4 SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSO PARA LA NEGOCIACIÓN DE AGENTES

Para definir el sistema de inferencia difuso, es necesario conocer el comportamiento del sistema. Para obtener ese conocimiento, se simuló la respuesta del sistema utilizando la estrategia del juego cooperativo presentada anteriormente. Se definieron tres escenarios de estudio que consisten en tres cambios de referencia en h_1 y h_2 en intervalos de tiempo que permiten alcanzar la condición de equilibrio (Tabla 1).

Tabla 1. Cambios de referencia en los escenarios seleccionados para estudiar el comportamiento del sistema

Referencias		Inicial	200 s	1700 s
Caso 1	h_1 (m)	0.10	0.13	0.15
	h_2 (m)	0.15	0.17	0.19
Caso 2	h_1 (m)	0.10	0.20	0.10
	h_2 (m)	0.15	0.20	0.15

En cada intervalo se calcula la energía de bombeo, el menor tiempo de residencia en los depósitos inferiores T_R y las alturas de los depósitos superiores h_3 y h_4 , cuando se ha alcanzado la referencia deseada para h_1 y h_2 . Estos valores se utilizaron para determinar los límites sobre el tiempo de residencia y la altura de los depósitos superiores y para obtener información del sistema a partir del análisis de la respuesta. En la tabla 2 se presentan los valores de las condiciones de operación para el caso 2. Con esta información se definieron los conjuntos difusos que

describen de forma cualitativa el comportamiento del sistema en función de los criterios seleccionados. Estos son los antecedentes de las reglas difusas.

Tabla 2. Resultados de la simulación para la obtención de reglas difusas

Estados de equilibrio	$h_1=0.10$ $h_2=0.15$	$h_1=0.20$ $h_2=0.25$	$h_1=0.10$ $h_2=0.15$
h_3 (m)	0,043	0,125	0,042
h_4 (m)	0,061	0,043	0,06
$q_a \times 10^5$ (m ³ /s)	8,13	13	6,66
$q_b \times 10^5$ (m ³ /s)	7,77	7,77	7,5
T_{R1} (s)	19,7	23,6	21,2
T_{R2} (s)	24,2	36,0	24,7

4.1 ANTECEDENTES Y CONJUNTOS DIFUSOS

En el caso de la energía de bombeo, se considera la variación relativa de la energía de bombeo respecto a la condición inicial para cada cambio de referencia:

$$EB = \frac{EB_a - EB_{ss}}{EB_{ss}} \quad (19)$$

Donde EB_{ss} es la energía de bombeo nominal tras un cambio de referencia y EB_a es la energía de bombeo absoluta. De este análisis se obtienen las particiones que se muestran en la figura 2, para describir el efecto de los movimientos de las variables manipuladas q_a y q_b sobre la energía de bombeo.

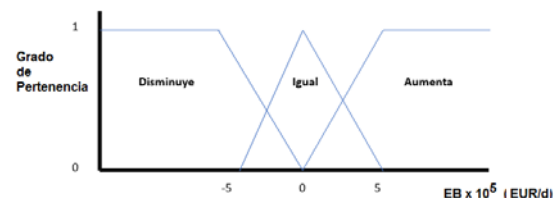


Figura 2: Conjuntos difusos definidos por la energía de bombeo (EB)

En el caso del tiempo de residencia T_R , se ha establecido un requerimiento de $T_R > 20$ segundos a partir del análisis del comportamiento del sistema. Este sería el tiempo necesario de almacenamiento para que el producto cumpla ciertas especificaciones. Los conjuntos difusos estarían definidos simplemente como: {cumple, no cumple}.

En el caso de la altura de los depósitos superiores, del análisis de comportamiento se establece como un límite de 0.12 m. Alturas superiores a ese valor son penalizadas, como producto en exceso almacenado. Se toma como variable de decisión la mayor entre h_3 y h_4 . En la figura 3 se presentan las particiones para esta variable de decisión.

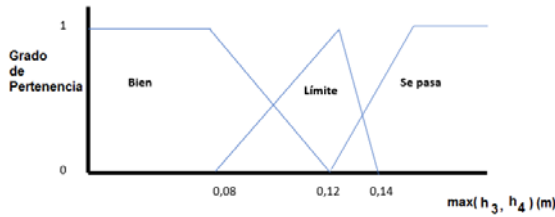


Figura 3: Conjuntos difusos definidos por las alturas h_3 y h_4

4.2 CONSECUENCIAS Y REGLAS DIFUSAS

Los antecedentes se utilizan para generar las reglas difusas que se utilizan para decidir qué señal de control aplicar en cada instante de muestreo. Se consideran 16 reglas difusas que permiten decidir sobre la bondad de la solución evaluada. Una solución buena, es una solución que cumple con los requisitos de T_R y de altura de los depósitos superiores, y cuya energía de bombeo (EB) disminuye o es igual a la del punto de operación. En caso contrario se considera una solución deficiente. Entonces, las reglas difusas se usan para asignar un valor a la calidad de cada posible señal de control, clasificándolas como: {buena, aceptable, mala}, asignando un valor a su importancia en el cálculo de la señal de control a enviar a la planta de 1 para las soluciones buenas, 0.5 para las una aceptables y 0.3 para las malas. Las reglas concretas son las siguientes:

1. Si T_R cumple, EB disminuye y $\max(h_3, h_4)$ bien la solución es buena
2. Si T_R cumple, EB es igual y $\max(h_3, h_4)$ bien la solución es buena
3. Si T_R cumple, EB aumenta y $\max(h_3, h_4)$ bien la solución es aceptable
4. Si T_R cumple, EB disminuye y $\max(h_3, h_4)$ límite es buena
5. Si T_R cumple, EB es igual y $\max(h_3, h_4)$ límite es aceptable
6. Si T_R cumple, EB aumenta y $\max(h_3, h_4)$ límite es mala
7. Si T_R cumple, EB disminuye y $\max(h_3, h_4)$ se pasa es aceptable
8. Si T_R cumple, EB es igual y $\max(h_3, h_4)$ se pasa es aceptable
9. Si T_R cumple, EB aumenta y $\max(h_3, h_4)$ se pasa es mala
10. Si T_R no cumple, EB disminuye y $\max(h_3, h_4)$ bien la solución es aceptable
11. Si T_R no cumple, EB igual y $\max(h_3, h_4)$ bien la solución es aceptable
12. Si T_R no cumple, EB aumenta y $\max(h_3, h_4)$ bien la solución es mala
13. Si T_R no cumple, EB disminuye y $\max(h_3, h_4)$ límite la solución es aceptable

14. Si T_R no cumple, EB igual y $\max(h_3, h_4)$ límite la solución es mala
15. Si T_R no cumple, EB aumenta y $\max(h_3, h_4)$ límite la solución es mala
16. Si T_R no cumple y $\max(h_3, h_4)$ se pasa esta solución es mala

La última regla cubre todas las posibles combinaciones de los conjuntos de energía de bombeo (EB) con la premisa de que el tiempo de residencia deseado no se cumpla (T_R no cumple) y la altura de los tanques superiores sobrepasen el valor deseado.

5 RESULTADOS

En este apartado se muestra el resultado obtenido al controlar el sistema de cuatro tanques utilizando el sistema de inferencia difuso para realizar la negociación entre los agentes que determina la señal de control óptima, y se comparan con el método de juego cooperativo descrito anteriormente en 2.4. Se realizaron simulaciones considerando cambios de referencia y perturbaciones en distintas zonas de la planta y los resultados se muestran en las figuras 4 a 7. Los cambios de referencia corresponden al caso 2 de la tabla 1, y las perturbaciones se simulaban como una obstrucción de los orificios de salida de los tanques (reducción del 10% en su área) que ocurre a los 950 s, y la segunda representa una pérdida de presión a la salida de las bombas que reduce el caudal en 10% (ocurre a los 2450 s).

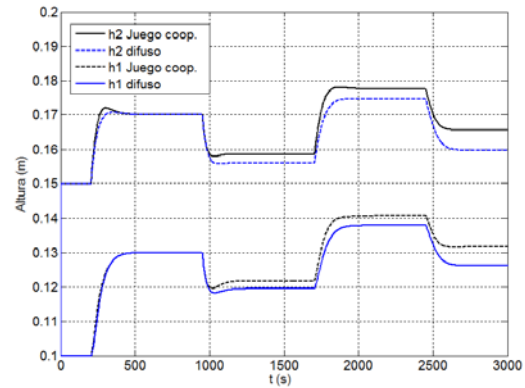
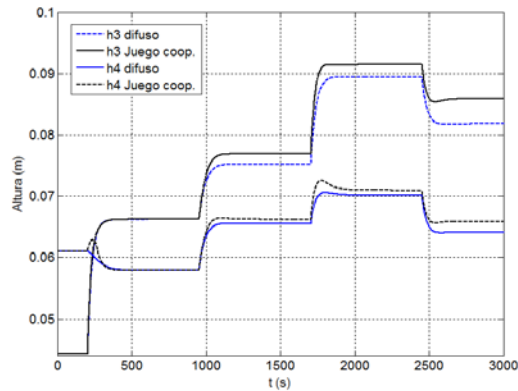
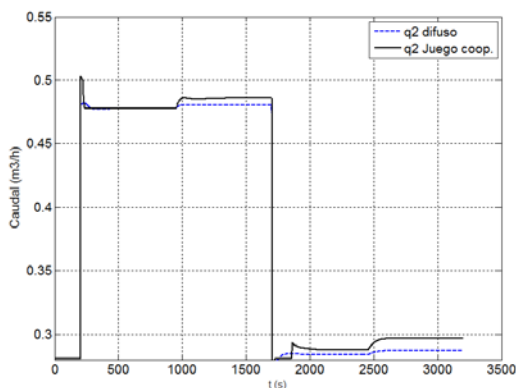
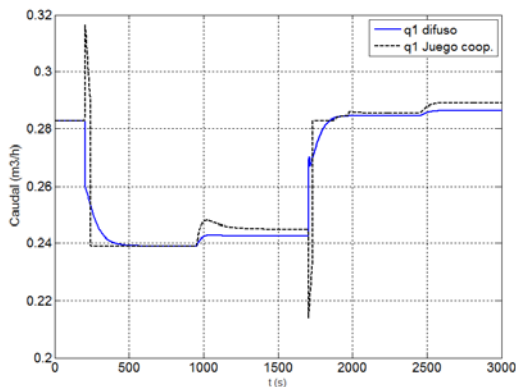


Figura 4: Evolución de las alturas h_1 y h_2

Figura 5: Evolución de las alturas h_3 y h_4 Figura 6: Señales de control q_1 Figura 7: Señales de control q_2

En las figuras 4 y 5 se puede observar que el comportamiento con ambas técnicas presenta ciertas diferencias, que fundamentalmente consisten en que con el algoritmo desarrollado basado en lógica difusa, las señales de control obtenidas son más suaves, con el consiguiente ahorro de energía. Las señales de control obtenidas se pueden observar en las figuras 6 y 7, donde se comprueba que con el método de negociación difusa son de menor magnitud en general, debido a la inclusión de la minimización de los costes de bombeo y la penalización sobre h_3 y h_4 en las reglas difusas. La respuesta a perturbaciones es aceptable aunque algunas producen un error en estado estacionario

debido a la imposibilidad de ambos algoritmos para rechazarlas completamente.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha implementado un algoritmo alternativo al del juego cooperativo que utiliza la lógica borrosa para introducir criterios de operación en la negociación para determinar la señal de control óptima en un controlador predictivo distribuido. Los resultados son satisfactorios obteniéndose un buen seguimiento de la referencia y rechazo adecuado a perturbaciones con menores esfuerzos de control. La técnica es prometedora debido a la facilidad para introducir nuevas reglas basadas en el conocimiento de los procesos, siendo una técnica extensible a plantas más complejas.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación MINECO a través del proyecto DPI2015-67341-C2-1-R y de la Fundación Samuel Solórzano (FS/21 - 2015).

Referencias

- Alvarado, I., Limon, D., Muñoz de la Peña, D., Maestre, J., Ridao, M., Scheu, H., Marquardt, W., Negenborn, R., De Schutter, B., Valencia, F. and Espinosa, J. «A comparative analysis of distributed MPC techniques applied to the HD-MPC four-tank ben.» *Journal of Process Control* 21(5), 2011: 800-815.
- Camacho, E. Bordons C. (2nd edn). Springer: London, England, 2004 . *Model Predictive Control in the Process Industry*. Londres: Springer, 2004.
- Johansson, K.H. «The quadruple-tank process.» *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 8, 2000: 456-465.
- Kouvaritakis, B. and Cannon, M. *Model Predictive Control*. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- Maciejowski, J. M. *Predictive Control with Constraints*. Prentice Hall, (2002).
- Maestre, J.M., D. Munoz de la Peña, E.F. Camacho. «Distributed model predictive control based on a cooperative game.» *Optimal Control Applications and Methods, Optim. Control Appl. Meth.* 32, 2011: 153-176.
- Mercangöz, M. and Doyle, F. pp.297-308. «Distributed model predictive control of an experimental four-tank system.» *Journal of Process Control*, 17(3), 2007: 297-308.
- Li, S, Zhang Y, Zhu Q. Nash-optimization enhanced distributed model predictive control applied to the shell benchmark problem. *Information Sciences—Informatics and Computer Science* 2005; 170:329–349.
- Valencia, F., Espinosa, J.J., De Schutter, B. and Stanková, K. Feasible-cooperation distributed model predictive control scheme based on game theory. *Proceedings of the 18th IFAC World Congress, Milan, Italy*, pp. 386–391, Aug.–Sept. 2011
- Valencia Arroyave, Felipe. *Game Theory Based Distributed Model Predictive Control: An Approach to Large-Scale Systems Control*. PhD Thesis. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Escuela de Electrónica, Medellín, Colombia 2012

- Yen, J., R. Langari, L.A. Zadeh. *Industrial Applications of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*. New York: IEEE Press, 1995.
- Zadeh, L.A. «Fuzzy logic and its application to approximate reasoning.» *In: Information Processing 74, Proc. IFIP Congr.*, 1974: 591–594.

Control Predictivo en el espacio de estados de un captador solar tipo Fresnel

Antonio J. Gallego, Mario de la Rosa, Eduardo F. Camacho

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Avenida de los descubrimientos s/nº 41092 (Sevilla)

agallego2@us.es, mardeltri@gmail.com, efcamacho@us.es

Resumen

Uno de los recursos más importantes para mejorar la eficiencia en los sistemas de energía solar, es el control avanzado. En general, con el uso de estrategias de control convencionales no se obtienen buenos desempeños en todo el rango de operación debido a la dinámica fuertemente no lineal de este tipo de sistemas, así como las múltiples fuentes de perturbaciones. En este trabajo se desarrolla un control predictivo basado en el espacio de estados para controlar un captador solar tipo Fresnel. Su comportamiento es analizado sobre el modelo de parámetros distribuidos no lineal de dicho captador.

Palabras clave: energía solar, colector Fresnel, control predictivo, observador LMI

1. Introducción

La necesidad de reducir el impacto de las fuentes de energía fósil tales como el carbón o el petróleo, produjo un gran interés en las fuentes de energía renovables a mediados de los 70. En los últimos 30 años, el uso de la energía solar ha experimentado un gran impulso, desde el punto de vista de la investigación y construcción de plantas comerciales. Una de las ventajas de la energía solar con respecto a otros tipos de energía renovables es la posibilidad de usar almacenamiento térmico [1].

Múltiples trabajos de investigación se llevaron a cabo en la planta experimental ACUREX en la plataforma Solar de Almería [2] y [3]. Desde el punto de vista de plantas comerciales, cabe citar las 13 plantas termosolares de tecnología cilindro-parabólica (CCP) de Abengoa solar operativas en España (50 MW cada una) [4].

En general, el objetivo de control en plantas termosolares es mantener la temperatura de salida en torno a un punto de funcionamiento. Sin embargo, esto no es tarea sencilla debido a que hay múltiples fuentes de perturbaciones tales como la radiación solar, temperatura de entrada, eficiencia óptica, etc. La fuente de perturbación más importante es la radiación solar, cuya variación a lo largo de un

día puede ser muy brusca [5].

Se han realizado múltiples pruebas de control en el campo del control de sistemas solares. Por ejemplo, en [6], se propone un control predictivo no lineal basado en un redes neuronales. En [7], se propone un MPC robusto basado en tubos para seguimiento de referencias. Estos dos controladores fueron probados en la planta experimental ACUREX. En [8], se propone un control predictivo combinado con un filtro de Kalman unscented para estimar estados y parámetros. En [9], se propone un método para hallar el punto óptimo de operación en plantas de tecnología CCP.

En este artículo, se propone un control predictivo en el espacio de estados el cual se aplica al captador solar tipo Fresnel ubicado en la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. El diseño del controlador es similar al propuesto en [10]. El observador de estado elegido, es un observador de Luenberger debido a que, por su planteamiento de diseño, se pueden imponer restricciones de comportamiento y estabilidad, las cuales se pueden resolver mediante un LMI con restricciones politópicas en el plano discreto [11]. La ventaja de este esquema es que, la estrategia de control final puede plantearse como un problema lineal cuadrático (QP) y resolverse de manera rápida y eficiente.

El artículo se organiza del siguiente modo: en la sección 2, se presenta el modelo matemático del captador. En la sección 3, se explica la estrategia de control. En la sección 4, se muestran algunos resultados de simulación y, en la sección 5, se muestran las conclusiones.

2. Descripción del modelo matemático del captador solar Fresnel

El captador solar usado en este trabajo, pertenece a la planta de refrigeración solar ubicada en la terraza de la Escuela de Ingenieros de Sevilla. Esta está formada por el captador solar Fresnel, una máquina de absorción de doble efecto y un sistema de almacenamiento basado en materiales de cambio de fase [12] y [13].



Figura 1: Campo de colectores Fresnel

El captador solar Fresnel está formado por 11 líneas de colectores Fresnel con una superficie total reflectante de 352 m². Los colectores concentran la radiación solar en un tubo de metal de 64 m de longitud (Figura 1), calentando el agua a presión que circula por él y, de este modo, alimentando la máquina de absorción. Si hay más energía de la que la máquina de absorción puede usar, esta puede ser almacenada en el tanque de almacenamiento.

Con respecto al modelo matemático, se pueden usar dos enfoques: el modelo de parámetros concentrados y el modelo de parámetros distribuidos. El modelo de parámetros concentrados proporciona una descripción puntual del captador Fresnel [14]. Es una descripción más simple que el modelo de parámetros distribuidos.

La ventaja del modelo de parámetros distribuidos es que, además de considerar la distribución espacial de la temperatura del fluido, modela la transmisión de calor metal-fluido. En este trabajo se usa el modelo de parámetros distribuidos para realizar simulaciones y evaluar el desempeño del controlador propuesto. El modelo de parámetros distribuidos se puede describir con dos ecuaciones diferenciales en derivadas parciales [15] del siguiente modo:

$$\begin{aligned} \rho_m C_m S_m \frac{\partial T_m}{\partial t} &= I K_{opt} n_o G - H_l G (T_m - T_a) \\ &\quad - l_p H_t (T_m - T_f) \\ \rho_f C_f S_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f C_f q \frac{\partial T_f}{\partial l} &= l_p H_t (T_m - T_f) \end{aligned} \quad (1)$$

Donde los subíndices m y f indican metal y fluido respectivamente. En el cuadro 1, se listan los parámetros del modelo y sus unidades.

La eficiencia óptica K_{opt} está formada por factores como la reflectividad, absorción del tubo, factor

Símbolo	Descripción	Unidades
t	Tiempo	s
l	Espacio	m
ρ	Densidad	kgm ⁻³
C	Capacidad calorífica	JK ⁻¹ kg ⁻¹
S	Área de la sección transversal	m ²
$T(x, y)$	Temperatura	K, °C
$q(t)$	Caudal	m ³ s ⁻¹
$I(t)$	Radiación Solar	Wm ⁻²
n_o	Eficiencia Geométrica	-
K_{opt}	Eficiencia óptica	-
G	Apertura del colector	m
$T_a(t)$	Temperatura ambiente	K, °C
H_l	Coefficiente de pérdidas térmicas	Wm ⁻² °C ⁻¹
H_t	Coefficiente de transmisión de calor metal-fluido	Wm ⁻² °C ⁻¹
l_p	Perímetro mojado	m

Cuadro 1: Descripción de los parámetros del modelo

de forma, etc. La eficiencia geométrica depende del ángulo de incidencia del sol y el factor de sombra [14].

La sistema de ecuaciones se resuelve dividiendo el tubo en 64 segmentos de 1 m de longitud y un tiempo de integración de 0.5 s.

El coeficiente de transmisión de calor H_t depende tanto de la temperatura como del caudal [16]. El valor de los otros parámetros se puede hallar en [17].

3. MPC en el espacio de estados

En esta sección se describe el MPC implementado en este trabajo. Las matrices para el modelo en el espacio de estados se obtienen a partir de las ecuaciones del modelo de parámetros distribuidos (ecuación (1)). Con el objetivo de reducir la carga computacional del controlador, el modelo lineal se obtiene dividiendo el tubo en 4 segmentos en lugar de los 64 requeridos en el modelo completo.

El objetivo de control de un sistema de energía solar como el captador Fresnel, es mantener la temperatura de salida en torno a una referencia deseada, usando para tal fin, el caudal como variable manipulable.

Debido a que solo las temperaturas de entrada y salida son accesibles, el resto de temperaturas deben ser estimadas. Para ello, se ha diseñado un observador de estado cuya ganancia es calculada por medio de un problema de asignación de polos

robusto, cuya solución puede ser obtenida mediante LMIs. Se considera incertidumbre politópica en la dinámica de la planta [11].

En primer lugar, se presenta el procedimiento de obtención de las matrices del modelo lineal y, posteriormente, se describe el método para computar la ganancia del observador de Luenberger.

3.1. Obtención de las matrices del modelo lineal

En esta subsección se describe el procedimiento de obtención de las matrices lineales. El modelo lineal del sistema de ecuaciones diferenciales (ecuaciones (1)), está formado por un conjunto de matrices que dependen de las entradas y los estados del sistema. Sea x el vector de estados formado por las temperaturas de los 4 segmentos del metal y del fluido, T_{in} es la temperatura de entrada, q el caudal de agua, $I_e = IK_{opt}n_o$ es la radiación solar efectiva y T_a es la temperatura ambiente.

El modelo lineal, en tiempo continuo se puede computar usando (2):

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + B_d d(t) \\ y(t) &= Cx(t) \\ u(t) &= q \quad d(t) = \begin{bmatrix} T_{in} & I_e & T_a \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (2)$$

Las matrices lineales se puede obtener del siguiente modo:

$$\begin{aligned} P_0 &= \frac{-H_l G - l_p H_t}{\rho_m C_m S_m} & P_1 &= \frac{l_p H_t}{\rho_m C_m S_m} \\ P_2 &= \frac{l_p H_t}{\rho_f C_f S_f} & P_3 &= \frac{q}{S_f \Delta l} \\ P_4 &= -P_2 - P_3 \end{aligned} \quad (3)$$

$$A = \begin{pmatrix} P_0 & 0 & 0 & 0 & P_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_0 & 0 & 0 & 0 & P_1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & P_0 & 0 & 0 & 0 & P_1 \\ P_2 & 0 & 0 & 0 & P_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_2 & 0 & 0 & P_4 & P_3 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & P_2 & 0 & 0 & P_4 & P_3 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0_{1 \times 4} & \frac{1}{S_f \Delta l} & \dots & \frac{1}{S_f \Delta l} \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

$$B_{Tin} = \begin{bmatrix} 0_{1 \times 4} & \frac{q}{S_f \Delta l} & 0_{1 \times 3} \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

$$B_{Ie} = \begin{bmatrix} 1_{1 \times 4} \cdot \frac{G}{\rho_m C_m S_m} & 0_{1 \times 4} \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

$$B_{Ta} = \begin{bmatrix} \frac{H_l G}{\rho_m C_m S_m} & \dots & \frac{H_l G}{\rho_m C_m S_m} & 0_{4 \times 1} \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

$$B_d = \begin{bmatrix} B_{Tin} & B_{Ie} & B_{Ta} \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Es importante resaltar que A y B_{Ta} depende de los estados del sistema y de sus parámetros; B_{Tin} es función del caudal de agua u . Como ha sido comentado en la sección 2, los parámetros H_l , p_f , C_f y H_t dependen de la temperatura y del caudal de agua, mientras que ρ_m , C_m , S_f , S_m y G son constantes. El modelo lineal se discretiza con un tiempo de muestreo de 20 s. A partir de ahora, nos referiremos a las matrices discretas cuando hablemos de A , B y B_d .

3.2. Formulación del MPC en el espacio de estados

Desde los años 80, el control predictivo basado en modelo (MPC), ha experimentado un importante impulso en el campo de la investigación y de las aplicaciones industriales tales como plantas químicas y refinerías de petróleo.

Básicamente, la estrategia de un esquema de control MPC consiste en los siguientes 3 pasos [18],[19]:

- El uso de un modelo matemático para predecir la evolución futura del proceso en un intervalo de tiempo (horizonte).
- Calcular una secuencia de acciones de control que minimizan una función objetivo.
- Aplicar solo la primera acción calculada (horizonte deslizante), y recalculer la secuencia en cada periodo de muestreo.

La principal diferencia en las diferentes estrategias de control predictivo, es la tipología del modelo: lineal o no lineal. Si el modelo es lineal, el problema de optimización asociado puede ser resuelto eficientemente y se puede alcanzar el óptimo global [20]. Si el modelo es no lineal, el problema de optimización requiere la resolución de un problema de programación no lineal, el cual es computacionalmente más costoso de resolver y alcanzar el óptimo global no está asegurado. Particularmente en un proceso como el sistema de energía solar de este artículo, para poder resolver el problema no lineal en el tiempo de muestreo requerido, es necesario elegir horizontes pequeños [15].

Por otra parte, el uso de estrategias de control lineal en una planta donde la dinámica es muy no lineal, tiene algunos inconvenientes. El desempeño

de los controladores lineales se deteriora si el sistema evoluciona lejos del punto de funcionamiento de diseño. En los sistemas de energía solar, la dinámica de la planta deviene muy lenta con grandes retardos a bajos caudales [21]. Para tratar de solucionar este problema, en este artículo, las matrices del modelo de predicción del MPC cambian con el punto de funcionamiento.

Ante la dificultad de predecir la evolución de algunas entradas del sistema tales como la temperatura de entrada T_{in} , y la radiación efectiva I_e y la temperatura ambiente T_a , la evolución de estas variables a lo largo del horizonte de predicción se consideran constantes.

Dado que la variable manipulable es el caudal, dos restricciones son tenidas en cuenta:

- caudal de agua entre 2 y 13 m³/h.
- variación máxima de la señal de control en cada periodo de muestreo de ± 2 m³/h.

La bomba de agua se modela como un sistema de primer orden con una ganancia unitaria y una constante de tiempo de 6 segundos. El controlador MPC requiere la solución de un problema QP, resuelto con el toolbox de optimización de Matlab.

$$\begin{aligned} \min_{\Delta u} J = & \sum_{k=0}^{N_y} (y(t+k|t) - y_{ref}(t+k))^T Q (y(t+k|t) - y_{ref}(t+k)) \\ & + \sum_{k=0}^{N_c} \Delta u^T(t+k) R \Delta u(t+k) \end{aligned}$$

s.t:

$$\begin{aligned} \Delta u_{min} &\leq \Delta u(t+k) \leq \Delta u_{max}, \quad k = 1, \dots, N_c \\ u_{min} &\leq u(t+k|t) \leq u_{max}, \quad k = 1, \dots, N_c \\ u(t+k|t) &= u(t+k-1) + \Delta u(t+k-1), \quad k = 1, \dots, N_c \\ x(t+k|t) &= Ax(t+k-1|t) + Bu(t+k-1|t) + B_d d(t) \\ y(t+k) &= Cx(t+k), \quad k = 1, \dots, N_y \end{aligned} \quad (11)$$

N_y y N_c son el horizonte de predicción y de control respectivamente.

3.3. Obtención de la ganancia de observación L

Tal como se ha mencionado anteriormente, solo algunas variables son directamente medibles. El resto de estados deben ser estimados mediante un observador. El observador elegido en este trabajo es un observador de Luenberger, cuya ganancia es calculada mediante una ubicación de polos robusta. Este enfoque permite que el problema pueda ser planteado como un conjunto de LMIs y resuelto mediante un toolbox de resolución de LMIs.

Para el diseño de este observador se imponen ciertos requisitos de desempeño en todo el rango de operación de la planta. Para cubrir todo el rango de operación, se ha empleado un politopo de 4 vértices (LDI) que representa el comportamiento en el rango de variación esperado en la temperatura y en el agua, variables de las cuales depende la dinámica del sistema. Las ecuaciones que describen la dinámica del observador de estado son:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= A(k, x, u)\hat{x}(k) + Bu(k) + B_d d(k) + \\ &\quad L(\hat{y}(k) - y(k)) \\ \hat{y}(k+1) &= C\hat{x}(k) \end{aligned} \quad (12)$$

Donde $A(k, x, u) \in \mathbf{Co}\{A_1, \dots, A_4\}$.

El error de estimación se define como $e(k) = \hat{x}(k) - x(k)$ y su dinámica viene dada por la siguiente ecuación:

$$e(k+1) = (A(k, x, u) + LC)e(k) \quad (13)$$

El objetivo del problema LMI que se formula en este artículo, es hallar una ganancia de observación L de modo que $e(k)$ converja a 0 para $k \rightarrow \infty$ para el sistema descrito por el politopo LDI. Los requerimientos de diseño se imponen mediante restricciones en la ubicación de polos, es decir, no solo los polos deben estar dentro del círculo unidad (estabilidad), si no que se impone que su ubicación para los vértices del politopo, esté dentro de un radio máximo. Es interesante hacer notar que, para evitar términos no lineales en el LMI, se formula el problema con $(A(k, x, u) + LC)^T$, dado que los autovalores de una matriz cuadrada, son los mismos que los de su traspuesta.

Esto, matemáticamente, se expresa del siguiente modo: hallar una matriz W de tal modo que los siguientes LMIs se satisfacen para cada vértice del politopo [22]:

$$\begin{aligned} \min_{W, Y} r \\ A_i^T W + C^T Y + W A + Y^T C > 0 \end{aligned} \quad (14a)$$

$$\begin{bmatrix} -rW & A^T W + C^T Y \\ WA + Y^T C & -rW \end{bmatrix} < 0 \quad (14b)$$

Con $Y = L^T W$ y $r \in (0, 1)$, corresponden a las siguientes condiciones para la ubicación de polos [11], [23]:

- $\text{Re}(\lambda(A_i + LC)) > 0$
- $|\lambda(A_i + LC)| < r$

Aunque las condiciones impuestas en (14b) son no lineales, realmente son condiciones bilineales, con lo que el problema se puede relajar iterativamente, buscando el valor mínimo de r para el cual el problema LMI mantiene la factibilidad. La matriz de observación obtenida viene dada por:

$$L = \begin{bmatrix} -0,1469 & -0,6427 & -1,1269 & -0,9801 \\ -0,1376 & -0,6004 & -1,0615 & -0,9618 \end{bmatrix}^T \quad (15)$$

En la figura 2, se muestran los polos para los vértices del LDI, así como el mínimo valor de r obtenido.

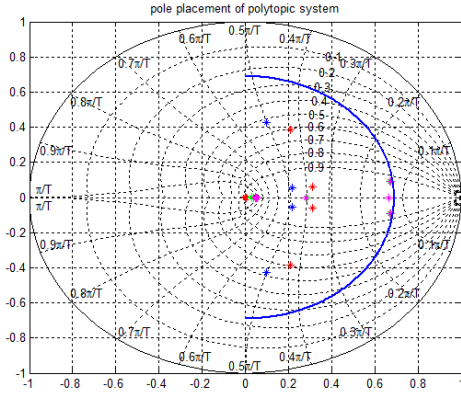


Figura 2: Resultado de la ubicación de polos obtenida resolviendo los LMIs propuestos

3.4. MPC con estimador de perturbaciones

Uno de los problemas que tiene el control predictivo en el espacio de estados es la aparición de un error en régimen permanente si el modelo no es suficientemente exacto. Para paliar este problema, el método propuesto en [24] se usa para compensar las diferencias entre el modelo lineal y la planta. Si consideramos un modelo lineal en el espacio de estados de la forma:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu(k) + B_d d(k) \\ y_k &= Cx_k \end{aligned} \quad (16)$$

$$u_k = u_{k-1} + \Delta u_k$$

La clave es estimar una señal de control virtual \hat{u}_k que no es necesariamente igual a la señal de control real u_k aplicada a la planta. Cualquier diferencia entre la planta y el modelo es incluida en esta señal virtual, que actúa como integrador de perturbaciones. La formulación final del observador de estados viene dada por (17):

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= A\hat{x}(k) + B(\hat{u}(k) + \Delta u(k)) + B_d d(k) \\ &\quad + L(\hat{y}(k) - y(k)) \\ \hat{u}(k+1) &= \hat{u}(k) + \Delta u(k) + L_u(y(k) - \hat{y}(k)) \end{aligned} \quad (17)$$

3.5. Esquema final de control

En esta subsección se muestra el esquema de control final. Cada 20 segundos, el sistema de adquisición de datos lee los sensores y el observador de estado calcula los estados estimados. Esta estimación se pasa al bloque de control MPC, que computa las matrices lineales y resuelve el problema de optimización (11). El resultado es la señal q_{pred} , la cual es añadida al controlador feedforward q_{ff} . La suma de ambas es la señal de control aplicada a la planta.

La razón de incluir un controlador feedforward es que ayuda al rechazo de perturbaciones [25]. El feedforward se calcula usando el modelo de parámetros concentrados como sigue [14]:

$$q_{ff} = \frac{IK_{opt}n_o S - H_l S((T_{ref} + T_{in})/2 - T_a)}{P_{cp}(y_{ref} - T_{in})} \quad (18)$$

Donde y_{ref} es la referencia de temperatura, S es la superficie reflectante de 352 m^2 y P_{cp} es un término que incluye la entalpía del fluido y otros factores geométricos [15]. La figura 3, muestra el esquema de control final:

4. Resultados

Se han realizado dos simulaciones comparando el comportamiento del MPC propuesto con un controlador PI+feedforward. El PI ha sido diseñado usando multiples simulaciones con diferentes condiciones de radiación y caudal de agua, y sus ganancias se han obtenido mediante un proceso de optimización offline, para asegurar que el comportamiento es adecuado en todo el rango de funcionamiento, evitando inestabilidades. Su expresión viene dada por la ecuación (19)

$$u_{PI}(k) = -0,2546 e(k) - 0,003122 \Sigma_e(k) \quad (19)$$

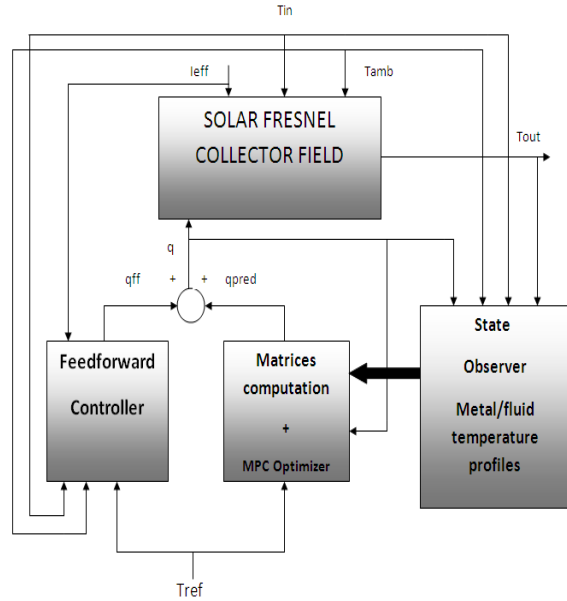


Figura 3: Esquema de control final

Donde $e(k)$ y $\Sigma_e(k)$ son el error y su integral discreta respectivamente. Para el controlador MPC se han elegido los siguientes parámetros: $N_y = 15$, $N_c = 10$, $Q = I$ y $R = 120$.

La figura 4 muestra una simulación de un día claro donde el set-point cambia a lo largo de todo el test. El valor inicial de T_{in} y T_{out} es 90°C y 99°C respectivamente. Como se puede comprobar, el desempeño del PI es similar al del MPC para caudales medios-altos, pero para bajos caudales, el desempeño del PI se deteriora produciendo comportamiento oscilatorio, mientras que el MPC logra desempeños buenos en todo el rango.

En la figura 5 se simula un día con perturbaciones en la temperatura de entrada y en la radiación solar. La temperatura de entrada y la temperatura de salida tienen un valor inicial de 152°C y 159°C respectivamente. A las 12.4 h la temperatura de entrada incrementa su valor hasta los 156°C , que produce un decremento en la temperatura de salida debido a la acción del feedforward, pero ambos controladores recuperan el seguimiento del set-point. A las 13.25 h, debido a nubes dispersas, la radiación cae a 0 y el caudal de agua se viene al mínimo de $2\text{ m}^3/\text{h}$, para minimizar la caída de temperatura. Aun así, en estas condiciones no es posible mantener la referencia de temperatura. Una vez que la nube ha pasado, el MPC recupera el seguimiento de set-point, de manera más suave. Desde 13.8 h hasta las 14.1 h, una segunda nube cubre el campo de colectores y la temperatura de entrada disminuye produciendo otra saturación en la acción de control. La parte final del test consiste en una serie de escalones incrementales en el

set-point. En este punto se puede ver que el PI deteriora su comportamiento en comparación con el MPC. Como se esperaba el desempeño y la robustez del MPC son superiores.

Con respecto al observador de estado, la figura 6 muestra la estimación de los perfiles del metal y del fluido. Como puede verse, los perfiles estimados están cercanos (con las lógicas diferencias) a los valores obtenidos con el modelo no lineal de parámetros distribuidos. El estimador de estado muestra convergencia rápida a pesar de las perturbaciones y cambios de referencia.

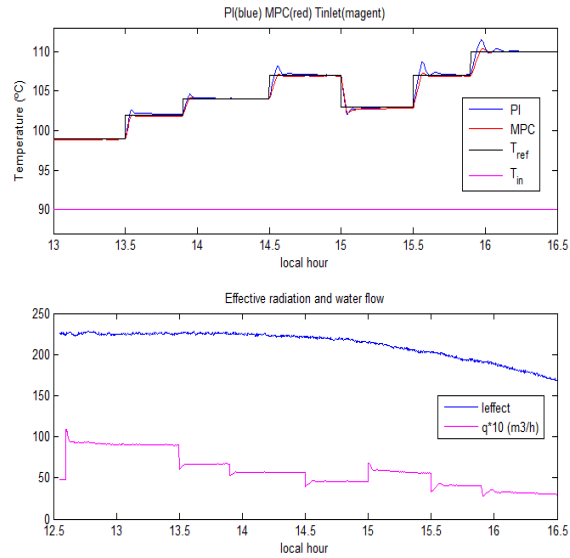


Figura 4: Día claro a baja temperatura. Comparación entre PI y MPC

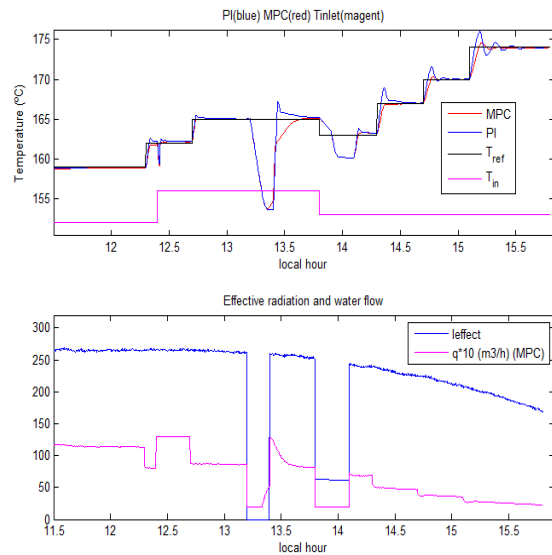


Figura 5: Día claro a alta temperatura. Comparación entre PI y MPC

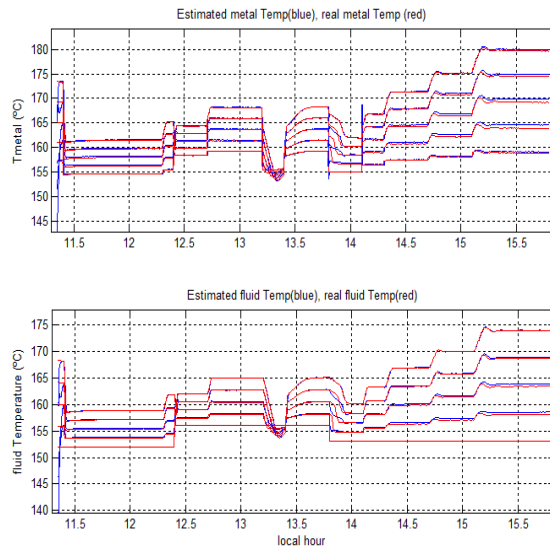


Figura 6: Día claro a alta temperatura: Desempeño del observador de estado

5. Conclusiones

En general, el uso de estrategias de control lineales no es suficiente para garantizar un comportamiento eficiente en todo el rango de operación de las plantas solares. En este artículo, se ha diseñado un MPC basado en observador de estado aplicado a una planta de colectores Fresnel.

El observador de estado ha sido obtenido mediante el planteamiento de varios LMIs, imponiendo restricciones en dinámica y estabilidad. El desempeño del MPC se ha comparado con un PI, cuyos parámetros han sido obtenidos mediante optimización para diferentes condiciones. El desempeño del MPC se ha mostrado superior en las pruebas realizadas.

El observador de estado ha mostrado también rapidez de convergencia y buena estimación en los estados.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la junta de Andalucía y al Ministerio de Educación por financiar el trabajo mediante los proyectos Gestión Óptima de Edificios de Energía Cero (P11-TEP-8129) y Control Predictivo de Microrredes Reconfigurables con Almacenamiento Híbrido y Móvil (DPI2016-78338-R).

Referencias

- [1] E.F. Camacho, M. Berenguel, F.R. Rubio, and D. Martínez. *Control of Solar Energy Systems*. Springer-Verlag, 2012.
- [2] E.F. Camacho, F.R. Rubio, M. Berenguel, and L. Valenzuela. A survey on control schemes for distributed solar collector fields. part I: Modeling and basic control approaches. *Solar Energy*, 81:1240–1251, 2007.
- [3] E.F. Camacho, F.R. Rubio, M. Berenguel, and L. Valenzuela. A survey on control schemes for distributed solar collector fields. part II: Advanced control approaches. *Solar Energy*, 2007b.
- [4] Abengoa Solar. Abengoa solar: Energía solar para un mundo sostenible, 2012.
- [5] A. J. Gallego and E. F. Camacho. Adaptive state-space model predictive control of a parabolic-trough field. *Control Engineering Practice*, 20(9):904–911, 2012.
- [6] P. Gil, J. Henriques, P. Carvalho, H. Duarte Ramos, and A. Dourado. Constrained adaptive non-linear neural model-based predictive control of a distributed collector field. *Proc. 2nd IHP Workshop*, 2002.
- [7] D. Limon, I. Alvarado, T. Alamo, M. Ruíz, and E. F. Camacho. Robust control of the distributed solar collector field acurex using MPC for tracking. *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*, pages 958–963, 2008.
- [8] G. Pin, M. Falchetta, and G. Fenu. Modeling and control of concentrating solar power systems: a discrete-time adaptive scheme for temperature control in molten-salt solar collector-fields. *In Solar Collectors: Energy Conservation, Design and Applications*, Series: Renewable Energy: Research, Development and Policies. Nova Publishers:15–39, 2009.
- [9] E. F. Camacho and A. J. Gallego. Optimal operation in solar trough plants: a case study. *Solar Energy*, 95:106–117, 2013.
- [10] A. J. Gallego, F. Fele, E. F. Camacho, and L. J. Yebra. Observer-based model predictive control of a solar trough plant. *Solar Energy*, 97:426–435, 2013.
- [11] Mahmoud Chilali and Pascal Gahinet. H_∞ design with pole placement constraints: An LMI approach. *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL*, 41:358–367, March 1996.
- [12] Pablo Bermejo, Francisco Javier Pino, and Felipe Rosa. Solar absorption cooling plant in seville. *Solar Energy*, 84:1503–1512, 2010.
- [13] A. J. Gallego, A. Ruíz-Pardo, A. Cerezuela-Parish, J. Sánchez Ramos, C. Martín-Macarena, L. F. CabezaCabeza, E. F. Camacho, and E. Oró. Mathematical modeling of

- a pcm storage tank in a solar cooling plant. *Solar Energy*, 93:1–10, 2013.
- [14] María Robledo, Juan M. Escaño, Amparo Núñez, Carlos Bordons, and Eduardo F. Camacho. Development and experimental validation of a dynamic model for a fresnel solar collector. *18th IFAC World Congress.*, October 2010.
 - [15] E.F Camacho, F.R Rubio, and M.Berenguel. *Advanced control of solar plants*. 1997.
 - [16] Frank Kreith, Raj M. Manglik, and Mark S. Bohn. *Principles of heat transfer*. Cengage Learning, seventh edition, 2011.
 - [17] Antonio J. Gallego. *Control Predictivo de sistemas de energía solar distribuidos*. PhD thesis, Universidad de Sevilla, June 2014.
 - [18] E.F. Camacho and C. Bordons. *Model Predictive Control 2º Ed*. Springer Verlag, 2004.
 - [19] J.B Rawlings and D.Q Mayne. *Model Predictive Control: Theory and Design*. Cheryl M. Rawlings, 2009.
 - [20] D.Q Mayne, J.B Rawlings, C.V Rao, and P.O.M Scokaert. Constrained model predictive control: Stability and optimality. *Automatica*, 36:789–814, 2000.
 - [21] Ricardo Carmona. *Análisis, Modelado y control de un campo de colectores solares distribuidos con sistema de seguimiento en un eje*. PhD thesis, Universidad de Sevilla, 1985.
 - [22] Stephen Boyd, Laurent El Ghaoui, Eric Feron, and Venkataramanan Balakrishnan. *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1994.
 - [23] J.M Gomes da Silva and S.Tarbouriech. Local stabilization of discrete-time linear systems with saturating controls: An lmi-based approach. *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL*, 46:119–125, January 2001.
 - [24] Urban Maedera, Francesco Borrelli, and Manfred Morari. Linear offset-free model predictive control. *Automatica*, 45:2214–2222, 2009.
 - [25] E.F. Camacho, F.R. Rubio, and F.M. Hughes. Self-tuning control of a solar power plant with a distributed collector field. *IEEE Control Systems*, 0272- 1708/92/:72–78, 1992.

CONTROL PREDICTIVO PARA LA OPERACIÓN EFICIENTE DE UNA PLANTA FORMADA POR UN SISTEMA DE DESALACIÓN SOLAR Y UN INVERNADERO

Juan D. Gil¹, Lidia Roca², Manuel Berenguel¹, Alba Ruiz-Aguirre¹, Guillermo Zaragoza², Antonio Giménez¹

¹Centro Mixto CIESOL, ceiA3, Universidad de Almería.

{juandiego.gil,beren,ara399,agimfer}@ual.es

²Centro Mixto CIESOL, CIEMAT-Plataforma Solar de Almería.

{lidia.roca,guillermo.zaragoza}@psa.es

Resumen

El déficit de agua en la zona del Mediterráneo afecta de forma directa a la agricultura. Una de las posibles soluciones consiste en suministrar el agua requerida por los cultivos mediante procesos de desalación térmica. En este trabajo, se propone un esquema de control predictivo no lineal (NMPC, Nonlinear Model Predictive Control) para gestionar el reparto del caudal de alimentación entre los diferentes módulos de destilación que componen la planta de desalación. El objetivo del problema de optimización consistirá en obtener una operación óptima en términos de eficiencia térmica de la instalación, al mismo tiempo que se satisfaga la demanda de agua del invernadero. Los resultados preliminares en simulación ponen de manifiesto la eficacia de la técnica desarrollada.

Palabras clave: Control de procesos, Control predictivo no lineal, Eficiencia térmica, Destilación por membranas.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, dos de los grandes retos a los que se debe enfrentar la humanidad son el cambio climático y la escasez de agua. Por este motivo, la gestión racional de los recursos hídricos y la promoción del uso de energías renovables, se han convertido en temas de vital importancia en el desarrollo mundial. En este contexto, la utilización de sistemas de desalación térmica alimentados con energía solar, representa una solución adecuada para el abastecimiento de agua en explotaciones agrícolas, especialmente en zonas áridas o semi-áridas con escasez de agua y grandes superficies de cultivos, como es el caso de la cuenca del Mediterráneo.

Uno de los sistemas de cultivo más extendidos en el sudeste de España son los invernaderos. La principal ventaja de este tipo de sistemas radica en que la productividad puede ser controlada a través de la correcta manipulación de las variables medioambientales, y la cantidad de agua y fertilizantes utilizados para el riego. De este modo, el uso de invernaderos se ha extendido de forma rápida,

afectando severamente a las reservas de agua. Este hecho es especialmente notable en la cuenca del Mediterráneo [10, 4]. Consecuentemente, la sostenibilidad del sistema de invernaderos en esta zona está comprometida, y por tanto, la búsqueda de fuentes de agua alternativas se ha convertido en uno de los objetivos prioritarios.

Los procesos de desalación impulsados con energía solar pueden ser una de las soluciones más adecuadas para combatir el déficit hídrico en zonas con buena disponibilidad de irradiancia solar y acceso a agua de mar, como es el caso del área del Mediterráneo. La destilación por membranas con apoyo de energía solar (SMD, *Solar Membrane Distillation*), es una tecnología que está siendo investigada para el desarrollo de pequeñas plantas autosuficientes de desalación [19]. Esta tecnología destaca por su baja temperatura de operación, la cual, permite que sea fácilmente combinable con tecnologías solares. La destilación por membranas (MD, *Membrane Distillation*) es un proceso impulsado térmicamente, en el que la fuerza impulsora es la diferencia de presión de vapor entre ambos lados de una membrana hidrófoba y microporosa. Los sistemas MD suelen ser clasificados dependiendo del lugar donde se produzca la condensación del permeado [1]. La configuración empleada en este trabajo es la Destilación por Membranas con Canal de Permeado (PGMD, *Permeate Gap MD*), en la cual, la condensación tiene lugar dentro del propio módulo. A pesar de su amplio rango de buenas características, la tecnología SMD tiene una serie de inconvenientes técnicos que han impedido hasta el momento que se comercialice a nivel industrial [7]. Uno de los impedimentos más significativos es la baja eficiencia térmica del proceso.

En la mayoría de los trabajos que se pueden encontrar hasta el momento en la literatura, se proponen algoritmos de optimización y control para maximizar la producción de destilado [14], o bien para maximizar la eficiencia térmica de la planta [2, 8, 15]. Sin embargo, hay muy pocos trabajos que tratan de optimizar la operación de una planta de destilación con el objetivo de satisfacer una determinada demanda de agua. En este sentido, en [16] se propone un algoritmo de control predictivo

vo para la operación de una planta de destilación multi-efecto, con el objetivo de satisfacer la demanda de agua diaria variable de un invernadero.

En este trabajo, se presenta un algoritmo de control predictivo para la operación óptima, en términos de eficiencia térmica, de un sistema formado por una planta SMD y un invernadero. El reto del presente trabajo consiste en maximizar la eficiencia térmica de la operación al mismo tiempo que se satisfaga la demanda de agua del invernadero, objetivos que requieren condiciones de operación contrarias. Para ello, se propone un algoritmo de control basado en un enfoque práctico del NMPC (PNMPC, *Practical Nonlinear Model Predictive Control*), con el que se pretende realizar una gestión óptima del caudal de alimentación para los diferentes módulos MD que componen la planta de desalación. Además, el algoritmo se complementa con el uso de una técnica de suavizado exponencial doble (DES, *Double Exponential Smoothing*), para la predicción de la radiación [12]. Los resultados preliminares obtenidos en simulación se comparan con una operación típica sin PNMPC, con el objetivo de analizar las ventajas del sistema de control propuesto.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En la Fig. 3 se presenta el diagrama esquemático de la planta estudiada. En esta planta, se debe gestionar la interconexión de dos instalaciones: un invernadero y una instalación SMD. El invernadero demanda agua para el riego diario de los cultivos, mientras que la desaladora produce destilado en módulos MD. Además, se dispone de un tanque de almacenamiento de destilado de 3 m³. Se debe hacer notar que la instalación considerada es un caso de estudio en simulación, basado en las dos instalaciones reales que se describen en las siguientes subsecciones.

2.1. Planta SMD

La planta piloto SMD (ver Fig. 1) de la Plataforma Solar de Almería (PSA, www.psa.es), es una de las pocas instalaciones MD totalmente descrita en la literatura [19]. En ella, la energía térmica necesaria para el proceso de destilado la proporciona un campo solar formado por dos filas de cinco captadores planos cada una. La salida del campo solar está conectada a un tanque de almacenamiento térmicamente aislado (1500 L), que se emplea como *buffer* o almacenamiento energético. Por último, los módulos se conectan al tanque a través de un intercambiador de calor, el cual se utiliza para calentar la solución de alimentación con el fluido

proveniente del sistema de generación de energía. Todas las variables registradas en esta planta se muestrean cada segundo.



Figura 1: Instalación piloto SMD en la PSA.

2.2. Invernadero

El invernadero empleado como referencia en este trabajo (ver Fig. 2) se encuentra en la Estación Experimental de Investigación de la fundación Cajamar en El Ejido, provincia de Almería. El invernadero tiene una superficie de 800 m² con un área de cultivo de 616 m². El material de la cubierta es polietileno, y cuenta con un sistema de ventilación automática con ventanas laterales en las paredes norte y sur. El cultivo crece en sacos de fibra de coco con seis plantas cada uno y tres goteros. En [16] fue presentada una descripción más detallada del invernadero. Las variables registradas en esta planta se muestrean cada 30 segundos.



Figura 2: Instalaciones del invernadero. Desde la izquierda hacia la derecha y desde arriba hacia abajo: invernadero, pipeta de riego y líneas de cultivo de tomates.

3. Modelado del sistema

Para la prueba del sistema de control propuesto, es necesario desarrollar un modelo que represente con exactitud el comportamiento de ambos sistemas.

3.1. Modelo de la planta SMD

El modelo de la planta SMD se puede dividir en dos grandes componentes unidos a través de un intercambiador de calor: el sistema de generación de energía, formado por el campo solar y el tanque de almacenamiento, y la unidad de desalación MD. El modelo del sistema de sistema de generación de energía térmica ya ha sido presentado en [5, 6]. Para este trabajo, con el objetivo de simplificar la simulación, en lugar de utilizar el modelo

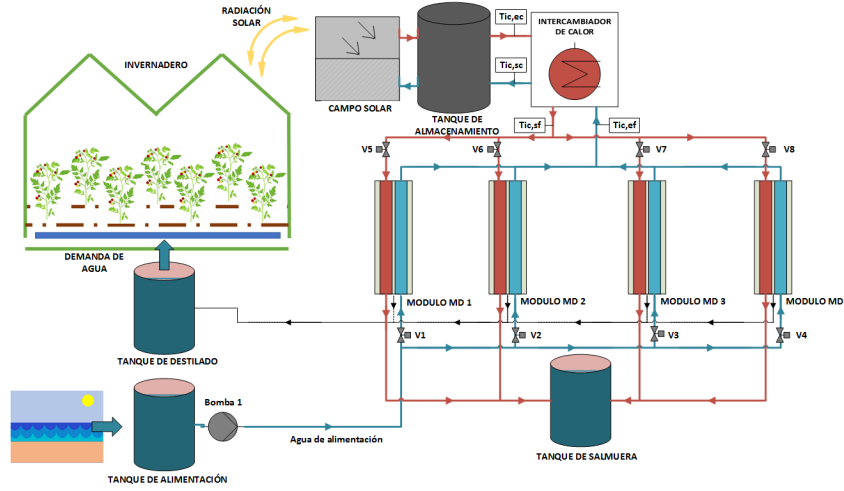


Figura 3: Diagrama esquemático de la instalación simulada como caso de estudio.

del sistema de generación de energía, se utilizarán perfiles de temperatura a la entrada del intercambiador de calor por la parte caliente, obtenidos mediante simulaciones del modelo del sistema de generación de energía, realizadas en días con condiciones meteorológicas similares a los utilizadas para las pruebas en simulación de este trabajo, y utilizando la estrategia de operación presentada en [5]. Por otra parte, el intercambiador de calor ha sido modelado mediante un modelo estático basado en primeros principios, como el presentado en [3]:

$$T_{ic,sc-m} = T_{ic,ec} - \eta_1 \cdot (T_{ic,ec} - T_{ic,ef}), \quad (1)$$

$$T_{ic,sf-m} = T_{ic,ef} + \eta_2 \cdot (T_{ic,ec} - T_{ic,sc-m}), \quad (2)$$

donde:

$$\eta_1 = \frac{1 - e^{\theta_{ic}}}{1 - \frac{\dot{m}_1 \cdot c_{p,1}}{\dot{m}_2 \cdot c_{p,2}} e^{\theta_{ic}}}, \quad (3)$$

$$\eta_2 = \frac{\dot{m}_1 \cdot c_{p,1}}{\dot{m}_2 \cdot c_{p,2}}, \quad (4)$$

$$\theta_{ic} = \alpha_{ic} \cdot A_{ic} \cdot \left(\frac{1}{\dot{m}_1 \cdot c_{p,1}} - \frac{1}{\dot{m}_2 \cdot c_{p,2}} \right), \quad (5)$$

$T_{ic,sc-m}$ es la temperatura de salida estimada por el modelo por la parte caliente del intercambiador, $T_{ic,ec}$ es la temperatura de entrada por la parte caliente del intercambiador, $T_{ic,ef}$ es la temperatura de entrada por la parte fría del intercambiador y $T_{ic,sf-m}$ es la temperatura de salida estimada por el modelo en la parte fría del intercambiador. Las unidades de la temperatura son $^{\circ}\text{C}$. Por otra parte, \dot{m}_1 y \dot{m}_2 son el flujo másico en kg/s de la parte caliente y fría del intercambiador respectivamente, mientras que $c_{p,1}$ y $c_{p,2}$ son la capacidad calorífica específica ($\text{J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$) del agua desmineralizada y del agua de mar. Por último, α_{ic} es el coeficiente de transferencia de calor del intercambiador y A_{ic}

es la superficie de intercambio del intercambiador. Para este trabajo se han considerado que los valores de estos parámetros son $689.30 \text{ W/}^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2$ y 3.15 m^2 respectivamente.

Para el modelado del módulo MD, se han llevado a cabo campañas experimentales siguiendo el procedimiento descrito en [18], con el fin de obtener modelos estáticos de la producción de destilado (D) y del ΔT , que es la diferencia entre la temperatura de salida del canal de condensación de cada módulo (canal azul en la Fig. 3) y la temperatura de entrada al canal de evaporación (canal rojo en la Fig. 3). Las entradas del modelo y su rango de variación son: i) caudal de alimentación (Q), 400-600 L/h, ii) $T_{ic,sf}$, entre 60-80 $^{\circ}\text{C}$ y iii) temperatura del tanque de alimentación (T_{ta}), 20-30 $^{\circ}\text{C}$. Así, las ecuaciones estáticas que caracterizan el módulo MD son:

$$D = 10 \cdot (-1,088 + 0,024 \cdot T_{ic,sf} - 0,018 \cdot T_{ta} - 0,001 \cdot Q + 0,00006 \cdot T_{ic,sf} \cdot Q), \quad (6)$$

$$\Delta T = -0,201875 + 0,1385 \cdot T_{ic,sf} - 0,158 \cdot T_{ta} + 0,0019 \cdot Q, \quad (7)$$

donde D es la producción de destilado en L/h. Las unidades para la temperatura son $^{\circ}\text{C}$ y para el caudal L/h. Por otra parte, el caudal de alimentación de cada módulo se controla mediante las válvulas de entrada (V1, V2, V3 y V4 en Fig. 3), las cuales varían su apertura entre 0 y 1. Además, durante la operación, V1 y V5, V2 y V6, V3 y V7, y V4 y V8, se abren o cierran al mismo valor, con el objetivo de obtener el mismo reparto de caudales en los dos canales de entrada de cada módulo. Por último, la bomba 1 suministra caudales entre 1600 y 2000 L/h.

3.2. Modelo del invernadero

En términos generales, la temperatura del aire del invernadero (T_{inv}) se puede modelar usando el siguiente balance de energía [17]:

$$c_{p,a}\rho_a \frac{V_g}{A_{ss}} \frac{dT_{inv}}{dt} = q_{cf,c} + q_{cf,s} - q_{ven} - q_{tr,c}, \quad (8)$$

donde $c_{p,a}$ es la capacidad térmica del aire ($J/kg^\circ C$), ρ_a es la densidad del aire (kg/m^3), V_g es el volumen del invernadero (m^3) y A_{ss} es la superficie del suelo (m^2), $q_{cf,c}$ es el flujo convectivo (W/m^2) con la cubierta, $q_{cf,s}$ es el flujo convectivo (W/m^2) con la superficie del suelo, q_{ven} (W/m^2) representa las pérdidas de calor provocadas por la ventilación natural, y $q_{tr,c}$ (W/m^2) es el calor latente de transpiración del cultivo.

Por otro lado, la humedad absoluta en el interior del invernadero (H_{inv}) se puede calcular en base al balance de masa de vapor de agua [17]:

$$\rho_a \frac{V_a}{A_{ss}} \frac{dH_{inv}}{dt} = \dot{M}_{tr,c} + \dot{M}_{evp,s} - \dot{M}_{cond,c} - \dot{M}_{vent} - \dot{M}_p, \quad (9)$$

donde $\dot{M}_{tr,c}$ ($kg/s \cdot m^2$) es el flujo de transpiración del cultivo, $\dot{M}_{evp,s}$ ($kg/s \cdot m^2$) es la evaporación del suelo, $\dot{M}_{cond,c}$ ($kg/s \cdot m^2$) es el flujo de condensado de la cubierta, \dot{M}_{vent} ($kg/s \cdot m^2$) es el flujo de salida de la ventilación natural, y \dot{M}_p son las pérdidas de humedad por la infiltración.

Con el objetivo de escalar el consumo de agua a los niveles de producción de la planta de desalación, se han utilizado cinco invernaderos con las características descritas en la Sección 2.2.

4. Análisis de la operación óptima del módulo MD

Para evaluar la eficiencia térmica de la planta de desalación se pueden utilizar diferentes métricas. En este caso, se utilizará un índice que mide la cantidad de energía térmica necesaria para producir una unidad de destilado (STEC, *Specific Thermal Energy Consumption*):

$$STEC [kWh/m^3] = \frac{Q \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T}{c_f \cdot D}, \quad (10)$$

donde ρ es la densidad del agua (kg/m^3), c_p es la capacidad calorífica del agua ($J/kg \cdot ^\circ C$) y c_f es un factor de conversión ($3.6 \cdot 10^6 J/kWh$).

Los valores de eficiencia térmica máxima se consiguen con diferentes condiciones de operación, de-

pendiendo del tipo de módulo MD y de la configuración empleada. Para analizar el comportamiento del módulo PGMD empleado en este trabajo se han realizado gráficas 3D, en las cuales se han representado el STEC y la producción de destilado en función de las dos variables principales que influyen en su comportamiento: el caudal de alimentación (Q) y la temperatura a la salida del intercambiador de calor por la parte fría ($T_{ic,sf}$).

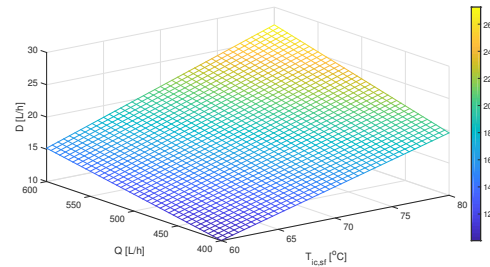


Figura 4: Gráfica 3D de la producción de destilado.

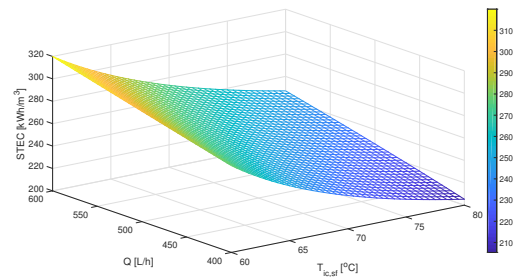


Figura 5: Gráfica 3D del STEC.

Como se puede apreciar en la Fig. 4, la máxima producción del módulo se consigue trabajando a máxima temperatura y máximo caudal. Por otro lado, basándose en la propia definición del STEC, a menor STEC, se conseguirá una operación más eficiente de la planta, ya que se requerirá menos cantidad de energía térmica para producir un volumen de destilado. De este modo, en la Fig. 5 se puede apreciar como el STEC mínimo se consigue operando a máxima temperatura y mínimo caudal. Por tanto, para minimizar el STEC y maximizar la producción de destilado, se requieren condiciones de operación en el caudal de alimentación de los módulos contrarias.

5. Sistema de control

En base al análisis realizado en la sección anterior, para maximizar la eficiencia térmica de la planta, se debe trabajar con el caudal de alimentación de cada módulo al mínimo. Sin embargo, el hecho de tener que cubrir una demanda de agua variable

(consumo del invernadero), hace que la producción de los módulos tenga que aumentar en determinados momentos, y por tanto, que estos no puedan operar constantemente a caudal mínimo. Este hecho, pone de manifiesto la necesidad de desarrollar algoritmos capaces de gestionar el caudal de alimentación de los módulos, dependiendo de la demanda de agua del invernadero en cada instante, y que tengan como objetivo principal conseguir una operación eficiente de la planta de desalación. Para este propósito, se ha desarrollado un esquema de control PNMPC [13], el cual, determinará los caudales de alimentación óptimos en cada módulo MD (Q_1 , Q_2 , Q_3 y Q_4) en base a las condiciones de operación en cada momento (ver Fig. 6). Además, el algoritmo PNMPC se ha complementado con una técnica de predicción de la radiación [12], con el fin de obtener unas predicciones del comportamiento de la planta más precisas.

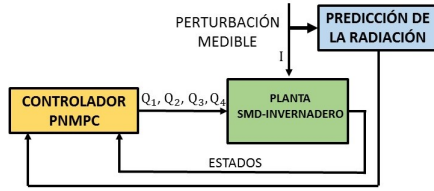


Figura 6: Esquema del controlador PNMPC

5.1. Algoritmo PNMPC

La técnica PNMPC se utilizará para predecir el nivel del tanque de destilado y el STEC medio de los cuatro módulos MD que componen la planta, en función de las señales de control futuras.

El algoritmo PNMPC, como todas las técnicas MPC, se caracteriza por el uso de un vector de predicciones $\hat{\mathbf{Y}}$, el cual incluye las salidas futuras en un determinado horizonte de predicción N , en función de los cambios de control futuros $\Delta \mathbf{U}$:

$$\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{F} + \mathbf{G} \cdot \Delta \mathbf{U}, \quad (11)$$

donde \mathbf{F} es la respuesta libre y $\mathbf{G} \cdot \Delta \mathbf{U}$ es la respuesta forzada. En los algoritmos MPC clásicos, $\hat{\mathbf{Y}}$ se estima mediante el modelo lineal del sistema. Sin embargo, en la técnica PNMPC, $\hat{\mathbf{Y}}$ se calcula haciendo uso del modelo no lineal presentado en la Sección 3. De este modo, siguiendo el procedimiento propuesto en [13], la técnica PNMPC se usa para estimar \mathbf{F} y \mathbf{G} en cada instante de muestreo. La formulación de la técnica viene dada por

la siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{Y}}_1 \\ \hat{\mathbf{Y}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1 \\ \mathbf{F}_2 \end{bmatrix} + \mathbf{G}_{\text{PNMPC}} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U}_1 \\ \Delta \mathbf{U}_2 \\ \Delta \mathbf{U}_3 \\ \Delta \mathbf{U}_4 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

donde:

$$\mathbf{F}_i = f(\mathbf{y}_p, \Delta \mathbf{u}_p), \quad (13)$$

$$\mathbf{G}_{\text{PNMPC}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{\mathbf{Y}}_1}{\partial \mathbf{U}_1} & \frac{\partial \hat{\mathbf{Y}}_1}{\partial \mathbf{U}_2} & \frac{\partial \hat{\mathbf{Y}}_1}{\partial \mathbf{U}_3} & \frac{\partial \hat{\mathbf{Y}}_1}{\partial \mathbf{U}_4} \\ \frac{\partial \hat{\mathbf{Y}}_2}{\partial \mathbf{U}_1} & \frac{\partial \hat{\mathbf{Y}}_2}{\partial \mathbf{U}_2} & \frac{\partial \hat{\mathbf{Y}}_2}{\partial \mathbf{U}_3} & \frac{\partial \hat{\mathbf{Y}}_2}{\partial \mathbf{U}_4} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

\mathbf{y}_p es un conjunto de valores pasados y presentes de las salidas y $\Delta \mathbf{u}_p$ es un conjunto de valores pasados de las entradas. \mathbf{Y}_1 es la predicción del STEC medio de los cuatro módulos, \mathbf{Y}_2 es la predicción del nivel del tanque de destilado, y \mathbf{U}_1 , \mathbf{U}_2 , \mathbf{U}_3 y \mathbf{U}_4 , son los caudales de cada módulo (Q_1 , Q_2 , Q_3 y Q_4). Se debe tener en cuenta que esta técnica solo proporciona una aproximación de las predicciones, sin embargo, esta aproximación se ajusta mejor al comportamiento del sistema que un modelo lineal, ya que se utilizan modelos linealizados en cada instante de muestreo para calcular $\mathbf{G}_{\text{PNMPC}}$, mientras que el modelo no lineal de la planta se usa para calcular \mathbf{F} manteniendo las futuras entradas de control constantes.

5.1.1. Función de coste

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo principal consiste en maximizar la eficiencia térmica de la planta de desalación. No obstante, también se pretende asegurar el suministro de agua demandado por el invernadero. Para este propósito, se intentará mantener el tanque de destilado en un nivel mayor o igual a 1500 L, lo que aseguraría el abastecimiento del invernadero durante dos días, ya que el consumo medio por día es de alrededor de 750 L. Se debe hacer notar que, el mantenimiento del nivel deseado del tanque de destilado se puede incluir como una restricción no lineal en el problema de optimización. Sin embargo, este hecho, en combinación con las restricciones que se presentan en la siguiente subsección, daría lugar a soluciones infactibles del problema en días en los que la planta SMD tenga una producción más baja. Así, siguiendo las técnicas de suavizado de restricciones presentadas en [9], la restricción del nivel del tanque se incluye en la función objetivo, ponderada por un factor λ que tomará diferentes valores en función del nivel medio del tanque en cada instante de muestreo:

$$J = \sum_{j=1}^N \delta(j) \hat{\mathbf{Y}}_1(k+j|k) + \sum_{j=1}^N \lambda(j) (1500 - \hat{\mathbf{Y}}_2(k+j|k)), \quad (15)$$

donde N es el horizonte de predicción, $\hat{Y}_1(k+j|k)$ es la predicción del STEC medio de los cuatro módulos e $\hat{Y}_2(k+j|k)$ es la predicción del nivel del tanque de destilado, ambas calculadas en el instante $k+j$ con la información adquirida en el instante de muestreo k . Por otra parte, $\delta(j)$ y $\lambda(j)$ son factores de ponderación que varían su valor en función del nivel del tanque de destilado en cada instante de muestreo. Para ello, se comprueba si el nivel medio del tanque durante los diez minutos anteriores al muestreo de la técnica PNMPC es mayor o menor que 1500 L. En el primer caso, los valores de $\delta(j)$ y $\lambda(j)$ serán de 0.001 y 1 respectivamente, en el segundo contrario $\delta(j)=1$ mientras que $\lambda(j)=0$. De este modo, si el nivel del tanque no alcanza el nivel deseado, en la función objetivo se tendrá en cuenta la restricción del nivel, por el contrario, si el nivel del tanque supera el nivel deseado, la función objetivo tendrá como objetivo único minimizar el STEC.

Para resolver el problema de optimización se ha utilizado la función *fmincon* de MATLAB. Este método está basado en el algoritmo del punto interior, y ha sido seleccionado ya que proporciona buenos resultados (con bajos requerimientos de tiempo computacional) en problemas como el presentado en este trabajo, en los cuales, el sistema tiene un comportamiento no lineal suave y el problema está sujeto a restricciones lineales (ver siguiente subsección).

5.1.2. Restricciones

En primer lugar, se ha limitado a 50 L/h el incremento máximo y mínimo permitido en las señales de control en cada instante de muestreo (*slew rate*). Esta restricción está definida en la Ec. 16, y se ha impuesto ya que al trabajar con módulos iguales, se pueden llegar a múltiples soluciones óptimas, lo que puede provocar continuos saltos de caudal en los diferentes módulos.

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U}_{i_{\min}} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U}_i(k+j|k) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U}_{i_{\max}} \end{bmatrix} \quad j = 0, \dots, N_u - 1, \quad (16)$$

donde N_u es el horizonte de control.

La segunda restricción, Eq. 17, limita el caudal de funcionamiento máximo y mínimo permitido por cada módulo MD (400-600 L/h).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{i_{\min}} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \mathbf{U}_i(k+j|k) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{i_{\max}} \end{bmatrix} \quad j = 0, \dots, N_u - 1. \quad (17)$$

Finalmente, también se han introducido como restricciones el nivel máximo del tanque de alimentación (3000 L) y el rango de funcionamiento de la bomba 1 (1600-2000 L/h).

5.2. Técnica de estimación de la radiación.

Con el objetivo de mejorar la actuación de la estrategia PNMPC, se utiliza la técnica DES para estimar la irradiancia global, siguiendo las ideas presentadas en [12]. Esta técnica viene descrita por las siguientes ecuaciones:

$$S_k = \alpha y_k + (1 - \alpha)(S_{k-1} + b_{k-1}), \quad (18)$$

$$b_k = \theta(S_k - S_{k-1}) + (1 - \theta)b_{k-1}, \quad (19)$$

donde y_k es la medida real en el instante k . La primera expresión proporciona el valor estimado (S_k), mientras que la segunda proporciona la tendencia estimada (b_k), la cual, se calcula usando valores actuales y pasados de la serie. Las constantes α and $\theta \in (0,1)$ han sido obtenidas mediante técnicas de optimización haciendo uso de datos de irradiancia experimentales. De esta forma, la estimación de m periodos viene dada por la siguiente expresión:

$$\hat{y}_{k+m} = S_k + mb_k. \quad (20)$$

Hay diferentes formas de inicializar S_k y b_k [11]. En este caso, $S_o = y_k$ y $b_o = y_k - y_{k-1}$. Esta técnica ha sido implementada para estimar los N futuros valores de acuerdo al horizonte de predicción del controlador PNMPC.

5.3. Procedimiento de parada y arranque de los módulos

Debido a que los módulos MD producen muy poco destilado cuando funcionan a una temperatura más baja de 60°C, se ha desarrollado un procedimiento de arranque y parada de los módulos, el cual es ejecutado cada 10 minutos (de acuerdo al tiempo de muestreo de la técnica PNMPC) con el objetivo de evitar problemas de *chattering*. De este modo, se utiliza el modelo estático del intercambiador presentado en la Sección 3 para comprobar si la temperatura proveniente del tanque de almacenamiento permite operar los módulos a una temperatura superior a 60 °C. De modo que los módulos se arrancan o se paran si se cumple dicha condición o no.

6. Resultados

La estrategia de control se ha probado en simulación, utilizando datos meteorológicos de la Estación Experimental de la Fundación Cajamar, del día 1 de abril de 2015. Se han llevado a cabo diferentes ensayos con un tiempo de muestreo de 10 minutos y utilizando diferentes valores del horizonte de predicción y control. Los valores de la técnica DES empleados han sido $\alpha=0.9$ y $\theta=0.98$.

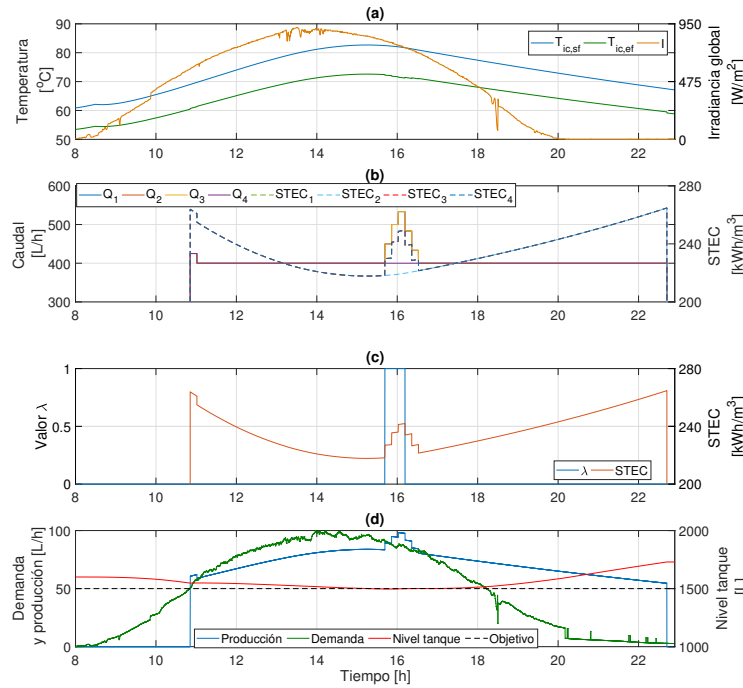


Figura 7: Resultados obtenidos en simulación con $N=N_u=2$.

En la Fig. 7, se muestra un ensayo llevado a cabo con $N=N_u=2$. En la Fig. 7a, se pueden observar las temperaturas de entrada y salida por la parte fría del intercambiador ($T_{ic,ef}$ y $T_{ic,sf}$) y la radiación (I). En la Fig. 7b, se muestran los caudales de alimentación de cada módulo (Q_1 , Q_2 , Q_3 y Q_4) y el STEC de cada módulo ($STEC_1$, $STEC_2$, $STEC_3$ y $STEC_4$). La Fig. 7c muestra el STEC medio de los cuatro módulos (variable a minimizar en la estrategia PNMP) y el valor del peso que pondera a la restricción del tanque en la función objetivo (λ). En la Fig. 7d se puede observar la producción de la planta SMD, la demanda del invernadero, el nivel del tanque de destilado, y el nivel deseado (objetivo).

Como se puede apreciar, la estrategia PNMP mantiene los módulos operando a caudal mínimo, siempre y cuando el nivel del tanque sea superior al nivel deseado (ver Fig. 7b y d). En torno a las 15.5 h, el nivel del tanque baja por debajo del nivel deseado (ver Fig. 7d), por lo que el valor de λ cambia a 1 (Fig. 7c). De este modo, la estrategia PNMP aumenta el caudal de los módulos 1, 2 y 3, intentando mantener el nivel del tanque deseado (ver Fig. 7b y d). En la Fig. 7c, se puede observar como el STEC aumenta cuando la estrategia PNMP incrementa los caudales de los módulos.

Para destacar las mejoras obtenidas mediante la aplicación de la técnica PNMP, en la Tab. 1 se comparan los resultados obtenidos con una operación con los caudales fijos a 500 L/h ($Q_1=Q_2=Q_3=Q_4=500$ L/h). Se puede observar

Tabla 1: Comparación de resultados.

PNMP	STEC [kWh/m³]	
	No	
PNMP	No	252.0955
	$N=N_u=1$	236.1308
	$N=N_u=2$	236.1309
	$N=N_u=3$	236.1309

que la aplicación de la técnica PNMP disminuye el STEC medio en unos 15.97 kWh/m³.

Se debe destacar que la estrategia de control desarrollada puede ser fácilmente modificada para realizar el diseño óptimo de la planta SMD en base a la demanda del invernadero.

7. Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo se ha desarrollado un algoritmo de control predictivo no lineal para la operación eficiente, en términos de eficiencia térmica, de una planta formada por un sistema de desalación SMD y un invernadero. Los resultados obtenidos en simulación, muestran que es posible cubrir la demanda de agua del invernadero. Además, la operación lograda mediante la aplicación del sistema de control, requiere de media 15.97 kWh menos de energía térmica para producir 1 m³ de destilado.

Los trabajos futuros estarán centrados en la modificación del algoritmo desarrollado para la realización de diseños óptimos de las plantas SMD, en base a una demanda de agua determinada.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado con el apoyo del proyecto DPI2014-56364-C2-1/2-R (ENERPRO), financiado por el Ministerio de Economía, Competitividad e Industria y fondos FEDER.

Referencias

- [1] A. Alkhudhiri, N. Darwish, and N. Hilal, "Membrane distillation: a comprehensive review," *Desalination*, vol. 287, pp. 2–18, 2012.
- [2] H. Chang, S.-G. Lyu, C.-M. Tsai, Y.-H. Chen, T.-W. Cheng, and Y.-H. Chou, "Experimental and simulation study of a solar thermal driven membrane distillation desalination process," *Desalination*, vol. 286, pp. 400–411, 2012.
- [3] A. de la Calle, L. Roca, J. Bonilla, and P. Palenzuela, "Dynamic modeling and simulation of a double-effect absorption heat pump," *International Journal of Refrigeration*, vol. 72, pp. 171–191, 2016.
- [4] M. Fernández, A. González, J. Carreño, C. Pérez, and S. Bonachela, "Analysis of on-farm irrigation performance in mediterranean greenhouses," *Agricultural Water Management*, vol. 89, no. 3, pp. 251–260, 2007.
- [5] J. D. Gil, L. Roca, A. Ruiz-Aguirre, G. Zaragoza, J. L. Guzmán, and M. Berenguel, "Using a nonlinear model predictive control strategy for the efficient operation of a solar-powered membrane distillation system," in *25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED 2017)*. Valleta, Malta, 2017, (Aceptado).
- [6] J. D. Gil, A. Ruiz-Aguirre, L. Roca, G. Zaragoza, and M. Berenguel, "Solar membrane distillation: A control perspective," in *23th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED 2015)*. Torremolinos, Málaga, Spain, 2015, pp. 796–802.
- [7] M. Khayet, "Solar desalination by membrane distillation: Dispersion in energy consumption analysis and water production costs (a review)," *Desalination*, vol. 308, pp. 89–101, 2013.
- [8] M. Khayet and C. Cojocar, "Artificial neural network modeling and optimization of desalination by air gap membrane distillation," *Separation and Purification Technology*, vol. 86, pp. 171–182, 2012.
- [9] J. M. Maciejowski, *Predictive control: with constraints*. Pearson education, 2002.
- [10] F. S. Martos, A. P. Bosch, and J. Calaforra, "Hydrogeochemical processes in an arid region of europe (almeria, SE Spain)," *Applied Geochemistry*, vol. 14, no. 6, pp. 735–745, 1999.
- [11] NIST. (2006) Engineering statistics handbook. url <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>.
- [12] A. Pawlowski, J. L. Guzmán, F. Rodríguez, M. Berenguel, and J. E. Normey-Rico, "Predictive control with disturbance forecasting for greenhouse diurnal temperature control," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 44, no. 1, pp. 1779–1784, 2011.
- [13] A. Plucenio, D. Pagano, A. Bruciapaglia, and J. Normey-Rico, "A practical approach to predictive control for nonlinear processes," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 40, no. 12, pp. 210–215, 2007.
- [14] R. Porrazzo, A. Cipollina, M. Galluzzo, and G. Micale, "A neural network-based optimizing control system for a seawater-desalination solar-powered membrane distillation unit," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 54, pp. 79–96, 2013.
- [15] M. R. Qtaishat and F. Banat, "Desalination by solar powered membrane distillation systems," *Desalination*, vol. 308, pp. 186–197, 2013.
- [16] L. Roca, J. A. Sánchez, F. Rodríguez, J. Bonilla, A. de la Calle, and M. Berenguel, "Predictive control applied to a solar desalination plant connected to a greenhouse with daily variation of irrigation water demand," *Energies*, vol. 9, no. 3, p. 194, 2016.
- [17] F. Rodríguez, M. Berenguel, J. L. Guzmán, and A. Ramírez-Arias, *Modeling and control of greenhouse crop growth*. Springer, 2015.
- [18] A. Ruiz-Aguirre, D.-C. Alarcón-Padilla, and G. Zaragoza, "Productivity analysis of two spiral-wound membrane distillation prototypes coupled with solar energy," *Desalination and Water Treatment*, vol. 55, no. 10, pp. 2777–2785, 2015.
- [19] G. Zaragoza, A. Ruiz-Aguirre, and E. Guillén-Burrieza, "Efficiency in the use of solar thermal energy of small membrane desalination systems for decentralized water production," *Applied Energy*, vol. 130, pp. 491–499, 2014.

Depuración de Aguas Residuales en la Industria 4.0

Jesús M. Gómez-de-Gabriel, Ana M. Jiménez Arévalo,
Laura Eiroa Mateo, y Javier Fernández-de-Cañete-Rodríguez

Dto. de Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela de Ingenierías Industriales - Universidad de Málaga
jesus.gomez@uma.es

Resumen

Este artículo presenta un sistema de automatización de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) mediante tecnologías de Industria 4.0. Se ha implementado un sistema Internet of Things (IoT) para la obtención de los datos de los sensores y envío de consignas a los actuadores. El sistema posee un sistema de control local que, junto con el resto de los componentes, se modelan como un sistema ciberfísico (CPS). Se ha implementado sobre una planta experimental, se ha creado una base de datos con la información histórica de los datos de los sensores y se están creando funciones para analizar la información e identificar el modelo de la planta.

Palabras clave: EDAR, estación depuradora de aguas residuales, IoT, CPS, Industria 4.0.

1. INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales generadas por la actividad humana son actualmente un serio problema y uno de los focos de contaminación más importantes para nuestros cauces y acuíferos. Los cada vez mayores volúmenes de aguas residuales con elevadas cargas contaminantes que nuestra sociedad produce hacen necesario un tratamiento más extendido e intensivo de las aguas residuales.

Las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) comprende un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos con el objetivo de obtener un agua efluente de mayor calidad en base a ciertos parámetros normalizados, siendo el proceso de lodos activos una de las tecnologías más utilizadas para este propósito y se emplean generalmente para la eliminación de contaminantes orgánicos en aguas residuales [5].

Los sistemas ciberfísicos (CPS) son integraciones de procesos físicos y de cálculo. Los sistemas de computación y sus redes integradas monitorizan y controlan los procesos físicos, generalmente con bucles de retroalimentación donde los procesos físicos afectan a la computación y viceversa. El diseño de tales sistemas, por lo tanto, requiere



Figura 1: Planta experimental de tratamiento de aguas residuales.

entender la dinámica conjunta de computadores, software, redes y procesos físicos [3].

La aplicación de IoT en la industria tiene su fundamento en la interconexión de todos los dispositivos involucrados en la producción, de forma que puedan enviarse grandes volúmenes de información del proceso en tiempo real, a través de Internet, siendo éstos captados por redes de sensores y configurando así, sistemas con aprendizaje automático o sistemas inteligentes. Gracias a la interconectividad de sensores a través de Internet es posible realizar un control eficaz del proceso industrial a distancia, lo que permite una mayor flexibilidad y optimización de tiempo y costes, utilizándose grandes volúmenes de datos gracias a los conceptos de *cloud storage* y *cloud computing* [1]. De hecho en [9] se plantea el uso de IoT como tecnología que hace posible una optimización de la recuperación de energía del agua de desecho de edificios residenciales, y en [2] se describe el diseño de un sistema de automatización de bajo coste de una EDAR utilizando una red de sensores Zigbee (IEEE STD 802.15.4).

El trabajo presentado describe la aplicación de IoT a una planta experimental EDAR (Véase Figura 1 y su conexión mediante protocolos de conexión a un servidor que almacena los datos históricos de operación. Se han creado unos sistemas ciberfísicos que permiten interactuar desde la red con cualquier componente de planta a diferentes

niveles. Asimismo se hace una revisión de las tecnologías que forman parte de la cuarta revolución industrial (industria 4.0), presentada en [6] que nos permitan la adquisición y almacenamiento de datos de la planta en tiempo real para su posterior análisis.

Este documento se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se introducen las tecnologías que forman parte de la Industria 4.0 que se han aplicado. En la sección 3 se describen la planta experimental objeto del estudio y su sistema de sensores así como el desarrollo del sistema de monitorización y control a través de IoT. Posteriormente, en la sección 4 se describen los experimentos realizados y se discuten los resultados obtenidos. Finalmente, en la sección 5 se incluyen conclusiones y se plantean trabajos futuros a realizar.

2. TECNOLOGÍAS EN LA INDUSTRIA 4.0

2.1. Internet de las Cosas

El *Internet de las Cosas* (IoT) consiste en la conexión a Internet de muchos millones de dispositivos, que recogen información del mundo real remotamente, y que puede ser compartida con otros sistemas y dispositivos. IoT se basa fundamentalmente en dispositivos (sensores, actuadores y controladores embebidos) identificados y conectados a Internet.

Gartner, Inc. prevé que en 2016 se estarán usando más de 6.400 millones de cosas conectadas, un 30 % más que en 2015, y que alcanzarán los 20.800 millones en 2020. En 2016, cada día se conectan 5.5 millones de nuevas cosas. El gasto esperado será de \$235.000 millones en 2016, un 22 % más que en 2015, en contratos de instalación y mantenimiento, pero sobre todo en servicios de conectividad.

Sus aplicaciones industriales IoT abarcan prácticamente todos los sectores, entre ellos la industria de automoción, servicios y productos, gestión ambiental, *smart cities*, etc.

2.2. Industria 4.0

Industria 4.0 o cuarta revolución industrial [8] pretende permitir una mayor adaptabilidad a los procesos de producción recogiendo datos a través de las máquinas y haciendo así más eficiente el uso de los recursos y por tanto dando paso a procesos más rápidos, más eficientes y con mayor flexibilidad, todo ello con un costo más reducido. Gracias a internet, se está haciendo posible la conexión entre máquinas y humanos en sistemas ciberfísicos a

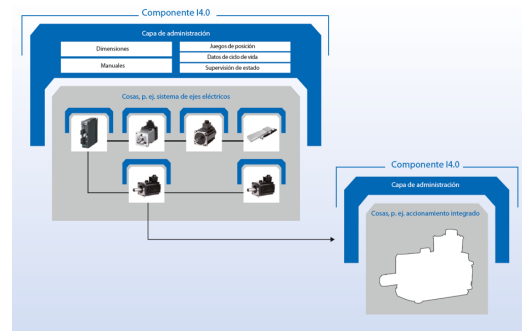


Figura 2: Esquema general de un CPS donde se muestra su capa de administración y su distribución jerárquica.

través de las redes.

2.3. Sistemas ciberfísicos

Los sistemas ciberfísicos (CPS) son sistemas híbridos compuestos por una parte física (que conecta con el mundo real a través de sensores y actuadores), y una parte virtual o de la información. Están compuestos por componentes (software, sensores, actuadores, sistemas de control embebido, ...) que colaboran para conseguir un comportamiento global. A diferencia del IoT, los CPS se basan en la relación entre computación y el mundo físico, en lugar de considerar el dispositivo físico.

Podemos considerar un componente físico combinado con su representación virtual digital como un ejemplo de un sencillo sistema ciberfísico (CPS) o el tipo de “componente de Industria 4.0” más simple. La representación virtual digital de ese componente puede contener tanto información general del tipo de dispositivo como información y servicios del componente concreto.

A los CPS se accede a través de su capa de administración, tanto de manera directa como indirecta si estos son componentes a su vez de otros CPS. En la figura 2 se muestra un esquema que muestra esta jerarquía. Los CPS pueden incluir componentes de diferentes fabricantes o proveedores, y formar parte de otros.

La construcción de un CPS plantea nuevos problemas, ya que se basan en diferentes tecnologías emergentes y engloba diferentes áreas de conocimiento y dominios técnicos, que requieren de nuevas disciplinas de ingeniería de sistemas: monitorización y control; sistemas complejos y de gran escala; sistemas tolerantes a fallos; interacción con el usuario; optimización; adaptación, gestión de cambios y resiliencia; control en tiempo real; sistemas distribuidos y sistemas de sistemas.

Existen plataformas de desarrollo y lenguajes de

modelado para el desarrollo de CPS mediante diseño basado en modelos (MBD). Se han construido diversos lenguajes de modelado de dominio específico (DSL) que permiten desarrollar CPS a partir de modelos gráficos, para supervisión de redes de suministro eléctrico.

2.4. Big data

El uso de IoT [12] produce una enorme cantidad de datos. Esos datos pueden ser procesados para extraer patrones, utilizables por otras aplicaciones y servicios como sistemas de salud, sistemas públicos de información, gestión de ciudades, eficiencia energética, gestión de residuos, gestión del agua. Estos servicios necesitan procesar la información en un servidor local o en la nube (*cloud computing*). Se crean así nuevos servicios como *smart cities*, *smart mobility*, *smart economy*, etc.

2.5. Controlando a través de IoT

En los sistemas de control convencionales, se asume que las redes de comunicaciones son deterministas y fiables. Los sistemas de tiempo real se basan en planificación estática de los tiempos de cómputo y comunicaciones [11]. Ahora algunos sistemas de control se efectúan a través de Internet, aunque a nivel supervisor en sistemas de distribución eléctrica o depuradoras de agua, y otros. La automatización en bucle cerrado, en muchos casos requiere de un controlador in-situ dedicado. Cerrar el bucle en IoT requiere resolver una serie de problemas que no se encuentran normalmente: control en redes no deterministas; retardo y *jitter*; ancho de banda; seguridad; interoperabilidad entre sensores y algoritmos.

Entre los avances que se espera que hagan posible cerrar el bucle de control en IoT se encuentran las comunicaciones celulares 5G, redes inalámbricas de baja latencia (*Tactile Internet*) [4] y las redes intermedias próximas a los sensores y actuadores (*Fog Computing*).

2.6. Seguridad

En las aplicaciones industriales, la seguridad es un factor muy importante. En [10] se plantea el problema de la seguridad en una red IoT superpoblada de dispositivos. Estudia la seguridad de diversos sistemas (SCADA, sistemas de control de tráfico, cámaras web, impresoras, etc.) y los ratios de vulnerabilidad van desde un 0.44% hasta un 40%.

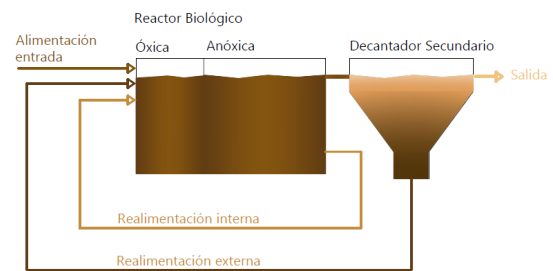


Figura 3: Esquema general de una depuradora de tipo nitrificación - desnitrificación.

3. PLANTA EXPERIMENTAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Las plantas de depuración de aguas residuales de tipo nitrificación-desnitrificación (NDN), tienen como función la eliminación del nitrógeno del agua residual mediante un proceso micro-biológico de oxidación del amonio mediante bacterias. El nitrato es reducido por bacterias a gas nitrógeno molecular, que es un componente de la atmósfera. El reactor biológico está formado por una zona anóxica y una zona aerobia respondiendo al modelo de depuración de nitrificación - desnitrificación representado en el esquema 3. En la cámara óxica se produce la nitrificación en el que el amoníaco es oxidado a nitritos y nitratos. En la zona anóxica se produce la desnitrificación, esto es, los nitratos y los nitritos son utilizados por bacterias heterótrofas como aceptores de electrones produciendo nitrógeno gas y un consumo de carbono orgánico biodegradable. El proceso se muestra en el esquema de la Figura 3

En esta trabajo se ha empleado un reactor biológico de lodos activos experimental, formada por el tanque de alimentación, el reactor biológico, un decantador secundario y un tanque de salida de agua clarificada mostrada en la figura 1.

El tanque de alimentación de entrada tiene una capacidad de 300 litros de agua sintética elaborada y dispone de los sensores necesarios para la medida de parámetros del agua residual. Los parámetros medidos en el tanque de entrada son:

- Concentración de materia orgánica.
- Concentración de nitrato.
- Concentración de amonio.
- PH
- Turbidez

En el interior del tanque de alimentación hay un agitador para evitar decantaciones en el mismo. Por otro lado, se dispone de bomba de alimentación de entrada para impulsar el agua sintética a cabecera del reactor biológico controlada mediante un controlador PID.

El reactor biológico está formado por una zona anóxica y una zona aerobia respondiendo al modelo de depuración NDN mostrado en la Figura 3.

Tanto en la zona anóxica como en la zona aerobia se instalan sensores de medida de oxígeno disuelto y sensores REDOX. Contiene un agitador en cada zona para evitar decantaciones en el reactor biológico. Para mantener el nivel de oxígeno disuelto en la zona aerobia se instala bomba soplante mediante difusores controlado por un controlador PID desde el PLC.

En el decantador secundario tiene lugar la precipitación de los flóculos generados en el reactor. En esta zona se instalan sensores para la medida de concentración de materia orgánica, concentración de nitrato y amonio y turbidez. El agua clarificada en la parte superior del decantador es conducida mediante gravedad hacia el tanque de salida.

Esta planta contiene una recirculación interna desde zona aerobia hacia cabecera del reactor biológico (zona óxica) para completar el proceso de nitrificación - desnitrificación. Por otro lado, dispone de realimentación externa para recircular fangos desde decantador secundario hacia reactor biológico. Ambas recirculaciones son controladas mediante un bucle de control PID implementado en el PLC.

3.1. Implementación de IoT

Para la obtención de las señales del proceso de EDAR y supervisión mediante IoT, ha sido necesario realizar una comunicación de intercambio de señales entre el PLC y el PC usando el protocolo de comunicaciones *Modbus* TCP/IP.

En [13] se plantea el uso de este protocolo basado en publicadores y subscriptores, para obtener información de diferentes elementos e incluso realizar procesos de control, empleando un broker o servidor local o remoto para controlar el intercambio de información. En este caso, se implementa el protocolo MQTT para realizar la conexión de las variables del PC con un servidor IoT público que permite el acceso remoto a modo de demostración.

Se han conectado las siguientes señales del proceso a modo de supervisión desde servidor remoto:

- Nivel de amonio tanque de alimentación

EDAR.

- Nivel de nitrato tanque de alimentación EDAR.
- Concentración de materia orgánica en tanque de alimentación.
- Nivel de amonio en decantador secundario.
- Nivel de nitrato en decantador secundario.
- Concentración de materia orgánica en decantador secundario.
- Oxígeno disuelto en cámara óxica del reactor biológico.

Por otro lado, desde un servidor remoto se controla la orden de marcha/paro del agitador de la zona óxica del reactor biológico. Además, se regula el régimen de funcionamiento y la orden de marcha/paro de la bomba de alimentación de entrada.

Desde el sistema de control del PLC se han modificado las librerías de motor, incorporando un modo de operación de equipos a nivel remoto. Una vez seleccionado el modo de control remoto externo IoT, queda anulado el control local desde HMI o desde SCADA.

Posteriormente, se deseaba emplear una base de datos para almacenar los históricos del sistema. Basándonos en el lenguaje SQL, se decidió emplear la base de datos *SQLite* que tal y como se describe en [7] permite crear tablas organizadas en su interior y cuenta con un gran tamaño de almacenamiento.

Con la base de datos seleccionada, se ha empleado el broker local *Mosquitto* de MQTT para almacenar los históricos en la base de datos *SQLite*. Inicialmente se extraen los valores de las variables por medio del protocolo *Modbus* TCP/IP haciendo uso de un script de *Python* con el que se publicarán los valores obtenidos en el servidor local de *Mosquitto*, tal como se muestran en la Figura 4.

De manera independiente, se crea la base de datos mediante otro script de *Python* pudiendo indicar el nombre, tipo y número de variables a almacenar. Finalmente, se creará un último script a modo de subscriptor encargado de almacenar los datos publicados en el servidor IoT en la base de datos. Este sistema cuenta con la ventaja de permitir crear y rellenar la base de datos desde un PC independiente al conectado al PLC de la planta.

Se han almacenado los siguientes históricos en la base de datos:

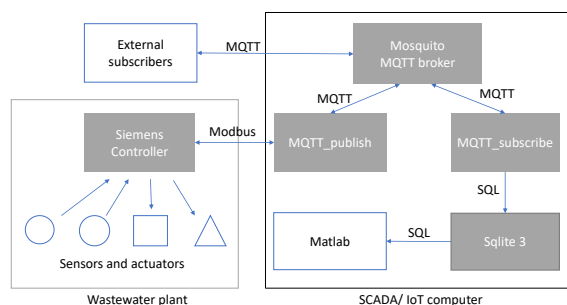


Figura 4: Esquema de la conexión de la planta de depuración de aguas residuales con su controlador existente a una red IoT mediante un servidor local que almacena la historia de las lecturas en una base de datos

- Nivel de amonio tanque de alimentación EDAR.
- Nivel de nitrato tanque de alimentación EDAR.
- Concentración de materia orgánica en tanque de alimentación.
- Temperatura tanque de alimentación EDAR.
- Nivel pH tanque de alimentación EDAR.
- Nivel de turbidez tanque alimentación EDAR.
- Caudal bomba alimentación de entrada.
- Oxígeno disuelto en cámara anóxica del reactor biológico.
- Redox en cámara anóxica del reactor biológico.
- Oxígeno disuelto en cámara óxica del reactor biológico.
- Redox en cámara óxica del reactor biológico.
- Caudal bomba de recirculación interna de la cámara óxica a la cámara anóxica.
- Nivel de amonio en decantador secundario.
- Nivel de nitrato en decantador secundario.
- Concentración de materia orgánica en decantador secundario.
- Nivel de turbidez en decantador secundario.
- Caudal bomba recirculación externa del decantador secundario a la cámara anóxica.
- Fecha de generación de históricos.
- Hora de generación de históricos.

Cabe destacar la existencia de otros servidores IoT públicos como *HiveMQ* o *Kafka* que también utilizan el protocolo MQTT, así como otras posibles bases de datos.

4. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Se realiza la puesta en marcha de EDAR con alimentación continua de entrada con agua residual sintética. Posteriormente, se ha adoptado la siguiente configuración de consignas de funcionamiento:

- Caudal de entrada = 8-10 l/h.
- Recirculación externa = 100 % del caudal de entrada.
- Recirculación interna = 150-200 % del caudal de entrada.
- Consigna *setpoint* oxígeno disuelto en cámara óxica = 1.5-2 mg/l.
- Agitador zona anóxica = funcionamiento en continuo.
- Agitador zona óxica = funcionamiento en continuo.
- Agitador tanque de alimentación de entrada = funcionamiento en continuo.

Durante el proceso de depuración se han obtenido resultados de rendimiento satisfactorios considerando la reducción de materia orgánica disuelta, así como reducción de turbidez a la salida y reducción del nivel de amonio a la salida.

No obstante, durante la puesta en marcha han aparecido no conformidades que se han detectado y solucionado, como la agitación ineficiente de la zona anóxica o la aparición de flóculos sobrenadantes en la superficie del decantador secundario produciendo la obturación del tubo de salida del decantador secundario.

La supervisión de variables de proceso desde el servidor remoto IoT es fluida, permite supervisar las curvas de tendencia en tiempo real y el almacenamiento de los datos es posible exportarlo a ficheros *.csv*. Al ser un servidor remoto IoT a modo demostración tiene un límite de variables a intercambiar.

Se ha puesto en marcha el almacenamiento de históricos empleando un subscritor tanto en el propio ordenador conectado al PLC como uno independiente. En ambos casos, el almacenamiento se ha realizado de manera satisfactoria y a una velocidad elevada permitiendo adquirir nuevos datos en cuestión de segundos.

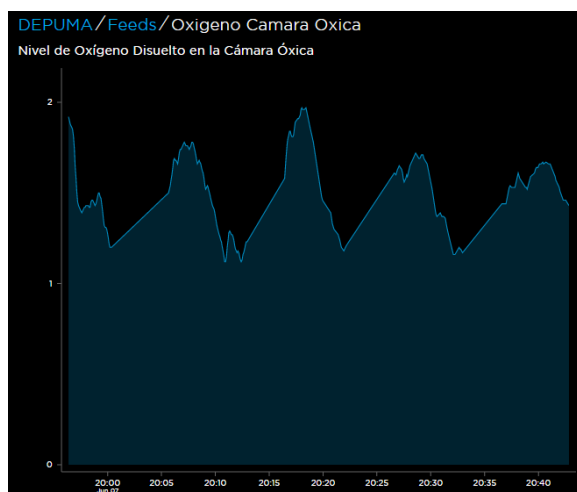


Figura 5: Curva tendencia Oxígeno Disuelto en Cámara Óxica con datos almacenados en servidor IoT de Adafruit.

Mediante el uso del servidor local, evitamos la limitación de variables a intercambiar, permitiendo almacenar todos los elementos que intervienen en el proceso. De igual forma, las bases de datos SQLite permiten almacenar hasta un total de 2 terabytes permitiendo almacenar datos a largo plazo.

Finalmente, se han representado gráficamente los valores almacenados en la base de datos mediante el uso de un script de *Matlab* y se ha implementado un sistema que permite el arranque y reinicio automático de los servicios del sistema de información.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se comprende la necesidad de la instalación de EDAR en los núcleos urbanos e industriales para garantizar el cumplimiento de la Directiva 91/271/CEE y el Plan Nacional de Calidad de las Aguas.

Desde un punto de vista de las comunicaciones, se han conectado las variables de proceso con servidor remoto IoT para supervisión y control de la EDAR. Esto ha permitido dar un paso hacia el concepto *Industry 4.0* gracias a la interconexión digital de objetos y procesos con Internet mediante IoT.

Para futuras líneas de trabajo, la planta podrá estar comunicada con otros equipos o bases de datos que permitan la identificación de cada uno de los procesos físico - químicos, a partir de los cuáles generar modelos matemáticos.

La identificación futura del proceso podrá plantear

nuevos bucles de control de equipos desde servidores IoT externos que se anticipen con el fin de optimizar el rendimiento de la EDAR. Por otro lado, el almacenamiento masivo de datos en bases de datos SQL permitirá el análisis mediante algoritmos de predicción.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Proyecto Puente B.2. "Desarrollo de Técnicas de Control y Estimación Neurogenéticas para Operación Óptima de Reactores Biológicos de Lodos Activos en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales" de la Universidad de Málaga.

Referencias

- [1] Chhatwal, A., Shukla, K., and Pathak, A. (2012). Application Development for the Internet of Things: Observations and Challenges.
- [2] Davies, R. (2015). Briefing Industry 4.0 Digitalisation for productivity and growth. Technical report, EPRS — European Parliamentary Research Service.
- [3] Derler, P., Lee, E. A., and Vincentelli, A. S. (2012). Modeling Cyber-Physical Systems. *Proceedings of the IEEE*, 100(1):13–28.
- [4] Fettweis, G. P. (2014). The Tactile Internet: Applications and Challenges. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 9(1):64–70.
- [5] Haandel, A. C. v. and Lubbe, J. G. M. v. d. (2012). *Handbook of biological wastewater treatment : design and optimisation of activated sludge systems*. IWA Pub.
- [6] Kagermann, H., Wahlster, W., and Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Technical report, National Academy of Science and Engineering.
- [7] Kreibich, J. A. (2010). *Using SQLite*. O'Reilly Media, Inc., 1st edition.
- [8] Lee, J., Bagheri, B., and Kao, H.-A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3:18–23.
- [9] Lynggaard, P. and Skouby, K. (2016). Complex IoT Systems as Enablers for Smart Homes in a Smart City Vision. *Sensors*, 16(11):1840.
- [10] Patton, M., Gross, E., Chinn, R., Forbis, S., Walker, L., and Chen, H. (2014). Uninvited Connections: A Study of Vulnerable Devices on the Internet of Things (IoT). In *2014 IEEE Joint Intelligence and Security Informatics Conference*, pages 232–235. IEEE.

- [11] Samad, T. (2014). The Web of Things and Cyberphysical Systems: Closing the Loop. In *W3C Workshop on the Web of Things, Berlin, June 2014*, Berlin.
- [12] Skouby, K. E. and Lynggaard, P. (2014). Smart home and smart city solutions enabled by 5G, IoT, AAI and CoT services. In *2014 International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I)*, pages 874–878. IEEE.
- [13] Stanford-Clark, A. and Truong, H. L. (2013). MQTT For Sensor Networks (MQTT-SN) Protocol Specification.

Control robusto con QFT del pH en un fotobiorreactor raceway

Ángeles Hoyo, José Luis Guzmán, José Carlos Moreno, Manuel Berenguel
 Dep. de Informática, Universidad de Almería, 04120 Almería, España. Tel: +34 950 214133;
 {ahs715,joseluis.guzman,jcmoreno,beren}@ual.es

Resumen

Este trabajo presenta una primera aproximación al control robusto del pH en un fotobiorreactor raceway para el cultivo de microalgas. En este tipo de procesos el pH es la variable más crítica a controlar teniendo una relación directa con la productividad del sistema. La dinámica del pH posee un carácter fuertemente no lineal estando afectada por numerosos factores tales como el aporte del CO₂ al medio de cultivo o la realización de la fotosíntesis por parte de las microalgas. Esta no linealidad genera una gran fuente de incertidumbre en el proceso incluso cuando el sistema es controlado alrededor del punto de operación deseado. Por tanto, en este artículo se ha procedido a realizar el modelado del sistema con incertidumbre paramétrica cubriendo los rangos de trabajo típicos del pH, y posteriormente se ha realizado el diseño de un controlador robusto con QFT para conseguir unos requisitos de rendimiento y estabilidad robustos determinados. El algoritmo de control resultante se ha evaluado en simulación frente a distintas condiciones de trabajo y en distintos puntos de operación obteniéndose resultados satisfactorios.

Palabras clave: control robusto, QFT, fotobiorreactores, simulación.

1. Introducción

Los fotobiorreactores raceway han sido estudiados desde 1950 con el fin de aportar una solución para el cultivo de microalgas a escala industrial. Hoy en día, debido a su escalabilidad y su factibilidad, son considerados como la tecnología más adecuada para el cultivo industrial de microalgas. La popularidad de los reactores raceway viene dada de su bajo coste de inversión inicial cuando son comparados con otras tecnologías, como los fotobiorreactores tubulares, los cuales requieren estructuras y equipos más complejos. Otras ventajas relevantes del reactor raceway son la simplicidad de operación y sus bajos costes de mantenimiento [1].

Numerosos estudios se han centrado en la selección óptima del diseño y configuración de los fotobio-

rractores raceway para conseguir que las microalgas crezcan en las mejores condiciones. Actualmente, existen numerosos diseños de fotobiorreactores raceway que varían ligeramente del diseño original propuesto por Oswald y Golueke [2], el cual aseguraba las condiciones óptimas de crecimiento. A pesar de la gran cantidad de diseños de la estructura del fotobiorreactor, el trabajo principal es el mismo y una gran cantidad de factores similares deben de ser alcanzados para obtener la producción deseada de biomasa, todos ellos relacionados con las variables que influyen en el proceso de crecimiento [3].

Tal y como se indica en [4], las variables más importantes que afectan al crecimiento de las microalgas son temperatura del medio, radiación solar, pH y oxígeno disuelto. Además, la respuesta fotosintética de las microalgas a la radiación solar depende de otras muchas variables que hacen que el sistema sea extremadamente complejo [5]. Para los reactores raceway, los requisitos de incidencia de la radiación solar y las condiciones de operación de temperatura viene determinados generalmente por la propia arquitectura del sistema. Por tanto, las variables a controlar en este tipo de reactores son el pH y el oxígeno disuelto. Ambas variables tienen una dinámica altamente dependiente del proceso de fotosíntesis y es necesario mantenerlas cercanas a unos puntos de operación deseados [6]. De estas dos variables, el pH es la variable más importante a controlar ya que posee una influencia directa en la correcta realización de la fotosíntesis. Dicha variable presenta una dinámica fuertemente no lineal viéndose afectada por la inyección de CO₂ en el medio y por el consumo de CO₂ durante el proceso de fotosíntesis. El control de esta variable se ha llevado a cabo en la literatura desde distintos puntos de vista. En [7] se realizó un control lineal con PI más controlador por adelante en torno al punto de operación deseado. Por otro lado, en [6] se realizó un control basado en eventos utilizando control predictivo basado en modelo, que posteriormente fue mejorado y combinado con un control selectivo y simultáneo del oxígeno disuelto [8].

Este trabajo presenta una nueva solución para el

control de pH mediante un diseño de un controlador robusto con QFT. De esta forma, la dinámica no lineal del sistema, así como las distintas fuentes de error, se han capturado en forma de un modelo de bajo orden con incertidumbre paramétrica. Una vez obtenido dicho modelo, se ha procedido a diseñar un controlador PID robusto con el fin de cumplir unas especificaciones determinadas de rendimiento y estabilidad. Los resultados han sido evaluados satisfactoriamente en un simulador no lineal del proceso [5], analizando el comportamiento en distintos puntos de operación y bajo diferentes condiciones de trabajo externas.

En la sección 2 del artículo se mostrará un breve resumen del proceso real del cual se han obtenido los datos utilizados en este trabajo. El modelo del sistema será presentado en la sección 3, y la sección 4 se dedica al diseño del controlador robusto con QFT. Los resultados de simulación se muestran en la sección 5, y la sección 6 está dedicada a conclusiones y futuros trabajos.

2. Descripción del proceso

El fotobiorreactor raceway utilizado como referencia en este proyecto y del cual se han obtenido los datos utilizados en este artículo se encuentra en la Estación Experimental Las Palmerillas, perteneciente a la fundación CAJAMAR (Almería). El fotobiorreactor tiene una área superficial de un total de 100 m², formado por dos canales de 50 m, cada uno de 1 m de ancho, unidos mediante una curva en forma de U (ver Figura 1). El fotobiorreactor trabaja a una profundidad constante de 0.2 m, tal y como recomienda Mendoza [9] para dar las mejores condiciones hidráulicas en términos de consumo de potencia, aportando un volumen total al reactor de 20 m³.

La parte de mezcla está formada por una rueda de pedales de 1.2 m de diámetro con 8 palas, hechas de contrachapado y controladas por un motor eléctrico (W12 35 kW, 1500 rpm, Ebarba, Barcelona) con engranajes reductores.

La carbonación se produce a un 1 de profundidad, en una fosa de 0.65 m de ancho, que abarca el ancho total del canal (1 m), y está situada a 1.8 m aguas debajo de las palas. El flujo de gas es inyectado mediante una membrana difusora de 3 platos en la parte más baja del foso. La pista y el foso están hechas de fibra de vidrio blanca de 3 mm de ancho (ver Figura 2).

3. Modelado del proceso

Desde el punto teórico, el control del pH es un problema no lineal, que solo puede ser linealizado

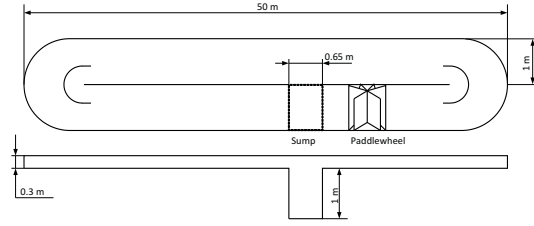


Figura 1: Esquema del fotobiorreactor



Figura 2: Fotobiorreactor industrial raceway

bajo varias circunstancias [5]. Considerando que la salida del proceso es el pH del cultivo, la apertura de la válvula de inyección de CO₂ es la variable manipulable, y la radiación solar es la mayor perturbación del sistema, el comportamiento del sistema puede ser representado con la siguiente ecuación diferencial [10], [11]:

$$\tau \frac{dpH}{dt} = u(t - t_r) + \beta(pH_0 - pH) + \gamma pH \quad (1)$$

El pH_0 es el pH en el punto de equilibrio, β es un factor para ajustar la constante de tiempo del sistema, α es la ganancia estática del sistema, u es la señal de control, que representa las inyecciones de CO₂, t_r es el tiempo de retardo, y γ and τ son los parámetros que dependen de la radiación solar y del estado del cultivo, respectivamente.

Este modelo lineal de bajo orden ha sido identificado teniendo en cuenta la estructura del fotobiorreactor, la distribución del sensor y actuador y las dinámicas observadas en los datos. El modelo anterior relacionado con la salida del pH y la inyección de CO₂ puede ser representada con las siguientes funciones de transferencia [10]:

$$pH = \frac{k}{1 + \tau s} e^{-t_r s} u_{CO_2} + \frac{k_r}{1 + \tau_r s} I \quad (2)$$

donde pH es el pH del cultivo, u_{CO_2} es el porcentaje de apertura de la válvula, I es la radiación global, k y k_r son las ganancias estáticas, y τ y τ_r las constantes de tiempo correspondientes.

Los modelos utilizados en este artículo para el desarrollo del control robusto han sido obtenidos para diferentes puntos de operación en torno a los cuales la productividad del sistema es máxima. Para ello, se han analizado los datos de relación pH y productividad observados en la figura 3 [8].

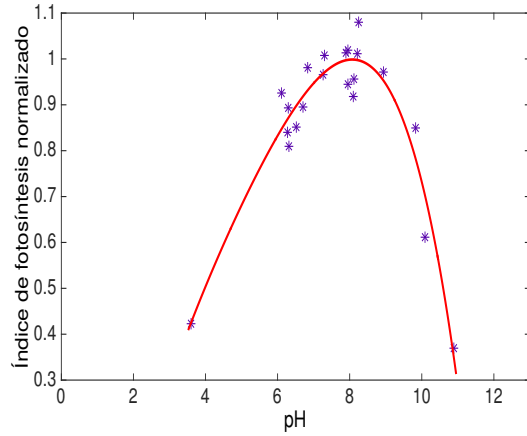


Figura 3: Relación pH y productividad

De esta forma, se escogieron los puntos de operación pH=7, pH=8 y pH=9, cubriendo así un amplio rango de trabajo y donde, como se verá más adelante, el modelo varía tanto en ganancia, en constante de tiempo y en retardo.

Para obtener los modelos, se han realizado diferentes trenes de pulsos en la inyección del CO₂ a lo largo del periodo diurno y en torno a cada uno de los puntos de operación, para un total de 20 días con diferentes condiciones medioambientales. Los modelos obtenidos se basan en la función de transferencia de primer orden del primer término de la ecuación (2). Destacar que, en esta primera versión del diseño de control robusto, únicamente se ha obtenido el modelo de esta primera función de transferencia, dejando pendiente el cálculo de la incertidumbre del segundo término para un trabajo futuro. La figura 4 muestra un ejemplo la validación del modelo para un determinado día de ensayo.

Se hicieron ensayos de 20 días y 3 puntos de operación diferentes, ascendiendo a un total de 60 ensayos. Una vez obtenidos los modelos para cada uno de estos ensayos, se calcularon las cotas de incertidumbre para el modelo del pH, resultando en (constantes de tiempo y retardo en segundos):

$$\begin{aligned} pH &= \frac{k}{1 + \tau s} e^{-t_r s} CO_2 \\ k &= [-4, 1, -0, 35] \\ \tau &= [3, 4, 8] \cdot 10^3 \\ t_r &= [1, 1, 4] \cdot 10^2 \end{aligned} \quad (3)$$

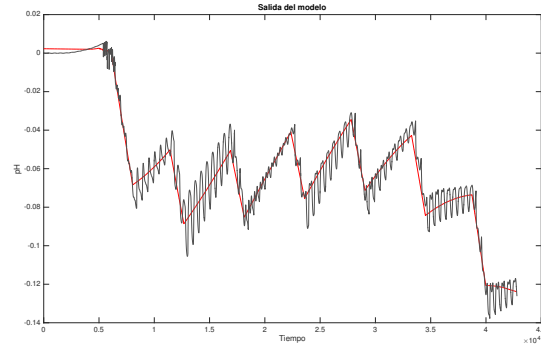


Figura 4: Validación del modelo. En rojo el modelo resultante.

Destacar la gran variabilidad en los parámetros debido al efecto diurno de la radiación en el proceso de fotosíntesis y el cambio de punto de operación.

4. Diseño del controlador

Teniendo en cuenta el modelo de primer orden con retardo comentado en el apartado anterior, y los valores de incertidumbre para ganancia, constante de tiempo y retardo, se ha optado por diseñar un controlador robusto basado en QFT [12].

Se asumen unas especificaciones de estabilidad dadas por un margen de fase mayor o igual a 45 grados para todos los puntos de operación. Para el seguimiento de referencias se han tomado las cotas dadas por las siguientes ecuaciones:

$$T_l(s) = \frac{1}{(6400s + 1)(2600s + 1)(1000s + 1)} \quad (4)$$

$$T_u(s) = \frac{1}{3500s + 1} \quad (5)$$

Estas especificaciones en frecuencia se corresponden con una constante de tiempo de lazo cerrado entre 58 y 175 minutos.

El conjunto de frecuencias seleccionado para diseño ha sido $W = \{0,0001, 0,0005, 0,001, 0,01\}$ rad/s. La figura 5 muestra la representación de la incertidumbre en el plano de Nichols para las frecuencias en W . En cada plantilla el nominal, dado por la ecuación (6), es marcado con un asterisco.

$$P_0(s) = \frac{-4,1}{3390s + 1} e^{-100s} \quad (6)$$

En la figura 6 se muestran las fronteras correspondientes a la especificación de estabilidad de 2.32dB y a la especificación de seguimiento de referencias dada por la magnitud de las cotas en las ecuaciones (4) y (5), evaluadas para las frecuencias en

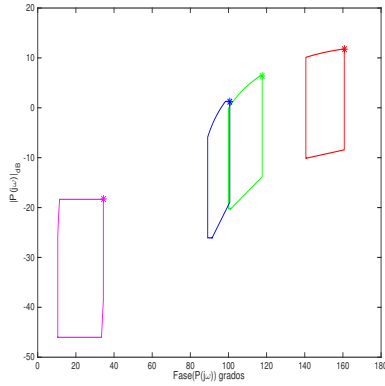


Figura 5: Plantillas (0.0001 - rojo, 0.0005 - verde, 0.001 - azul, 0.01 - magenta).

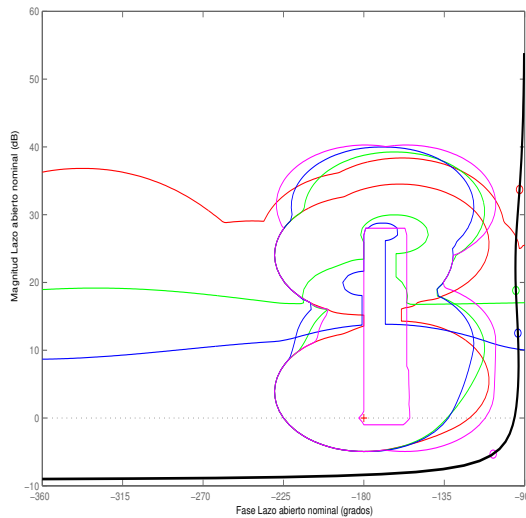


Figura 6: Ajuste de L_0 , fronteras de estabilidad y seguimiento (0.0001 - rojo, 0.0005 - verde, 0.001 - azul, 0.01 - magenta).

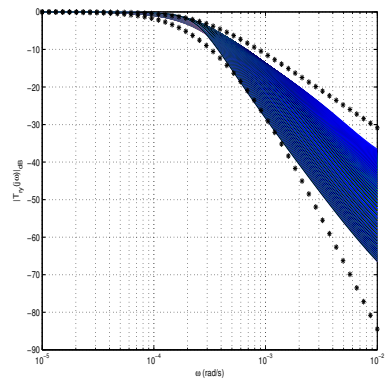


Figura 7: Validación de las especificaciones de seguimiento de referencia.

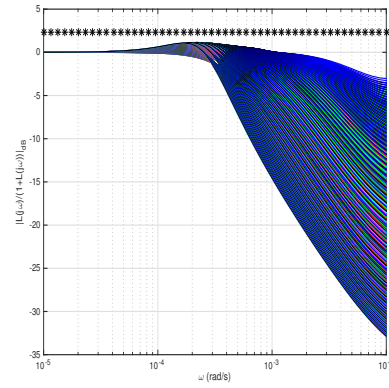


Figura 8: Validación de las especificaciones de estabilidad.

el conjunto W . En esta figura se puede observar también el ajuste de la función nominal de lazo abierto para el controlador PID dado por la siguiente ecuación:

$$C(s) = -34,2852 \left(1 + \frac{0,00035}{s} \right) \left(1 + 83,89265s \right) \quad (7)$$

Las figuras 7 y 8 muestran la validación del diseño para las especificaciones de seguimiento y de estabilidad, respectivamente.

5. Resultados

Esta sección presenta la evaluación en simulación del controlador robusto diseñado en los distintos puntos de trabajo. Para evaluar su correcto funcionamiento se han tomado como referencia diversos días con distintas condiciones climatológicas y en distintos puntos de operación, tratando de evaluar el rendimiento del controlador frente a la variabilidad de la dinámica del proceso.

Las simulaciones se han llevado a cabo haciendo uso del modelo no lineal del fotobiorreactor implementado en Simulink y desarrollado en [5]. Con el fin de analizar el comportamiento del sistema en los diversos puntos de trabajo, como referencia se le ha introducido, en diferentes ensayos, escalones descendientes del pH al comienzo del día.

Las figuras 9, 10, 11 y 12 muestran dos ensayos de ejemplo para un día soleado y otro con nubes, cada uno de ellos además en distintos puntos de operación, comenzando los escalones de los ensayos en valores iniciales de pH de 8.3 y 7.9 respectivamente. En dichas figuras se puede observar que el comportamiento del sistema es acorde a las especificaciones de diseño y es prácticamente el mismo en ambos días a pesar de comenzar en distintos puntos de trabajo y estar sometido a diferentes condiciones de clima, lo que hace demostrar el correcto funcionamiento del controlador robusto propues-

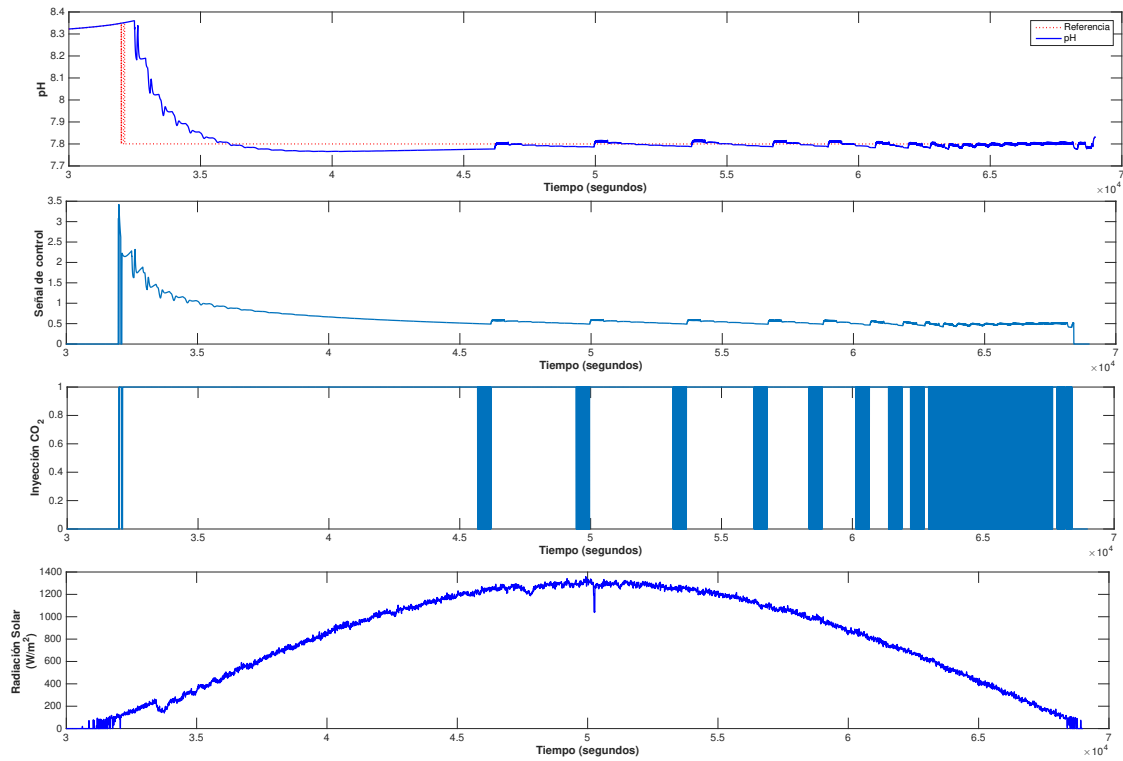


Figura 9: Ensayo día soleado para para un valor inicial de pH=8.3

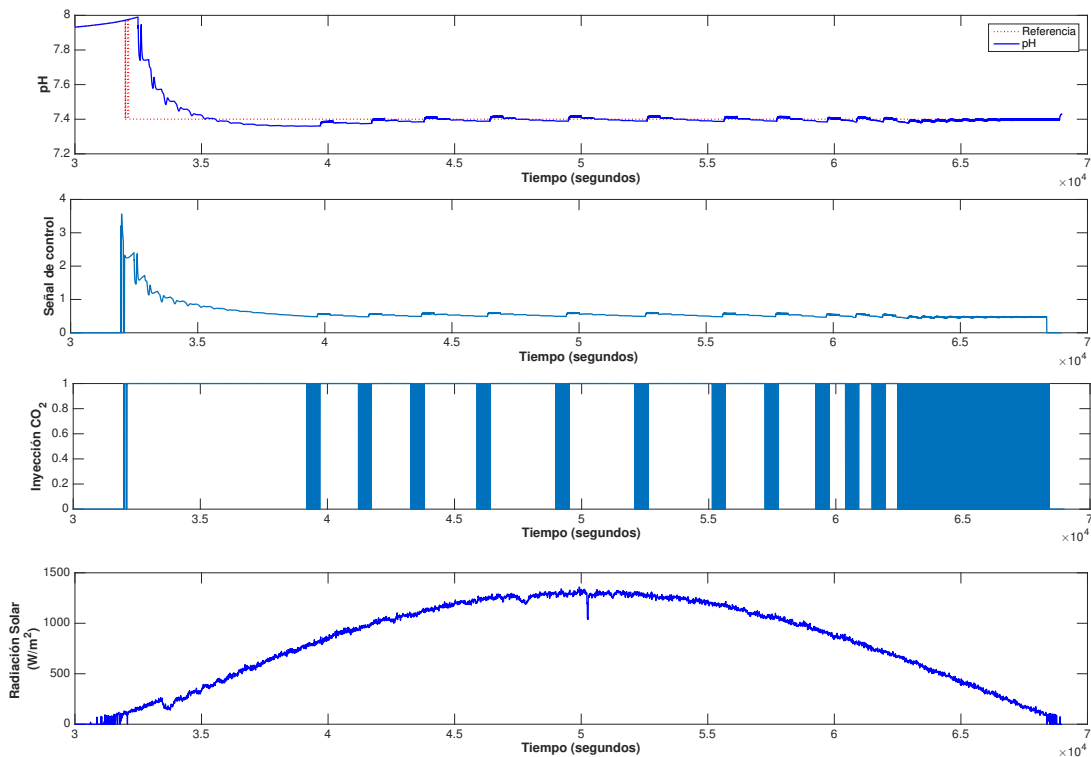


Figura 10: Ensayo día soleado para para un valor inicial de pH=7.9

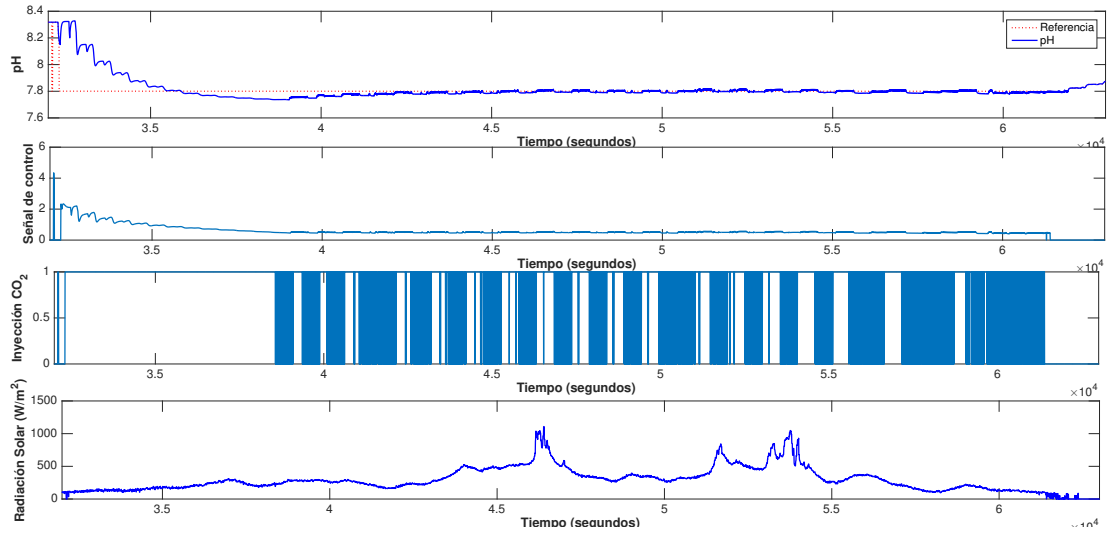


Figura 11: Ensayo día nublado para para un valor inicial de $\text{pH}=8.3$

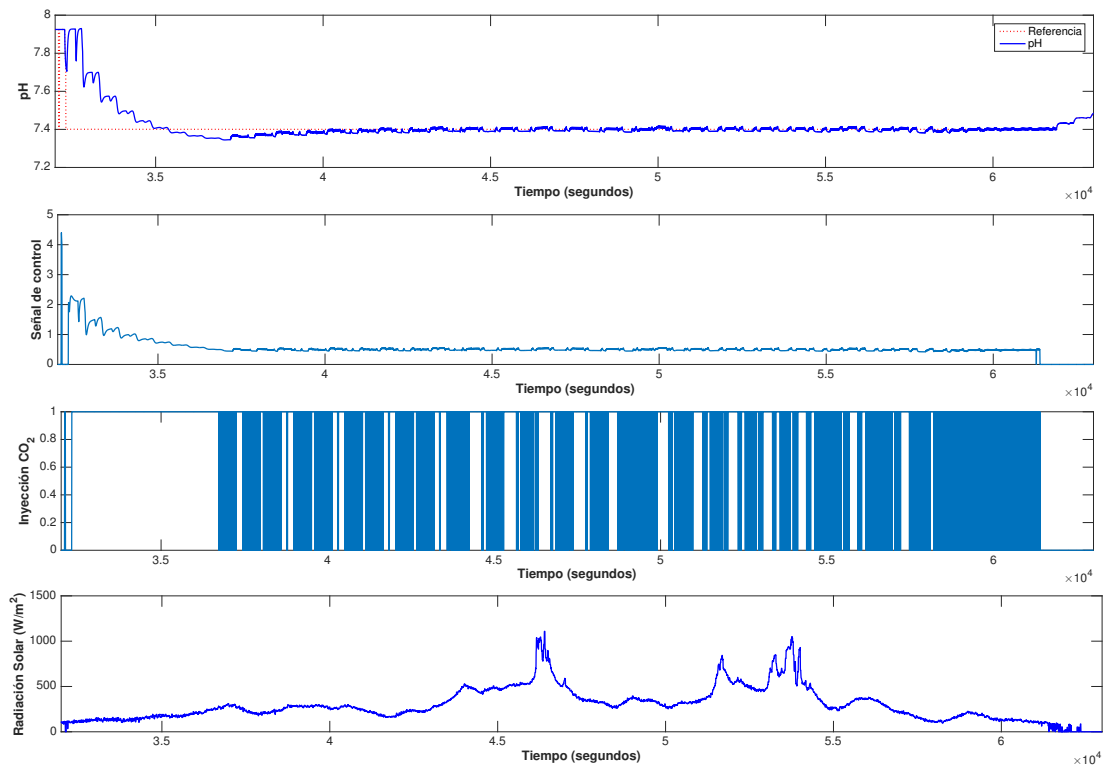


Figura 12: Ensayo día nublado para para un valor inicial de $\text{pH}=7.9$

to. La señal de control hace referencia a la salida del controlador PID, mientras que la inyección de CO_2 es la salida generada por el PWM.

6. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado el control robusto con QFT del pH de un reactor tipo raceway. En primer lugar, la dinámica no lineal del proceso ha sido capturada en forma de modelo de bajo orden con incertidumbre paramétrica. El modelo ha sido obtenido tras realizar ensayos para 20 días diferentes y 3 puntos de operación cercanos a la zona de productividad óptima del proceso. Posteriormente, se procedió al diseño de un controlador robusto que fue evaluado en simulación para diferentes puntos de operación y bajo diversas condiciones climatológicas, obteniendo resultados satisfactorios. Como trabajos futuros se pretenden capturar igualmente la incertidumbre del término del modelo referente a la perturbación del sistema y realizar un control por adelantado robusto. Igualmente, se tiene planificado realizar ensayos reales en el reactor industrial.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con el Proyecto del Plan Nacional DPI2014-55932-C2-1-R del Ministerio de Economía y Competitividad y Fondos FEDER.

Referencias

- [1] J. Weissman and R. Goebel, "Design and analysis of pond system for the purpose of producing fuels," (Institute, Golden CO, SERI/STR.), 231st ed. Solar Energy Research., 1987.
- [2] W. J. Oswald and C. G. Golueke, "Biological transformation of solar energy.," *Appl. Microbiol.*, vol. 2, p. 223–262, 1960.
- [3] C. Pawlowski, J. L. Mendoza, J. L. Guzmán, M. Berenguel, F. G. Acien, and S. Dormido, "Effective utilization of flue gases in raceway reactor with event-based ph control for microalgae culture," *Bioresource Technology*, vol. 170, pp. 1–9, 2014.
- [4] T. A. Costache, F. G. Acien, J. M. Morales, M. M. and Fernández-Sevilla, I. Stamatina, and E. Molina, "Comprehensive model of microalgae photosynthesis rate as a function of culture conditions in photobioreactors," *Applied Microbiology and Biotechnology*, pp. 7627–7637, 2013.
- [5] I. Fernández, F. G. Acien, J. L. Guzmán, M. Berenguel, and J. L. Mendoza, "Dynamic model of an industrial raceway reactor for microalgae production," *Algal Research*, vol. 17, pp. 67–78, 2016.
- [6] A. Pawlowski, J. L. Mendoza, J. L. Guzmán, M. Berenguel, F. G. Acien, and S. Dormido, "Selective ph and dissolved oxygen control strategy for a raceway reactor within an event-based approach," *Control Engineering Practice*, vol. 44, pp. 209 – 218, 2015.
- [7] I. Fernández, J. Peña, J. L. Guzman, M. Berenguel, and F. G. Acien, "Modelling and control issues of ph in tubular photobioreactors," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 43, no. 6, pp. 186 – 191, 2010. 11th IFAC Symposium on Computer Applications in Biotechnology.
- [8] A. Pawlowski, J. L. Mendoza, J. L. Guzmán, M. Berenguel, F. G. Acien, and S. Dormido, "Effective utilization of flue gases in raceway reactor with event-based ph control for microalgae culture," *Bioresource Technology*, vol. 170, pp. 1 – 9, 2014.
- [9] J. L. Mendoza, I. Granados, M.R. and deGodos, F. G. Acien, E. Molina, C. J. Banks, and S. Heaven, "Fluid-dynamic characterization of real-scale raceway reactors for microalgae production.," *Biomass and Bioenergy*, vol. 54, p. 267–275, 2013.
- [10] M. Berenguel, F. Rodríguez, and J. G. Acien, "Model predictive control of ph in tubular photobioreactors.," *Journal of Process Control*, vol. 14, p. 377–387, 2004.
- [11] E. Sierra, F. Acien, J. Fernández, J. García, C. González, and E. Molina, "Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae," *Chemical Engineering Journal*, vol. 138, pp. 136–147, 2008.
- [12] I. M. Horowitz, *Quantitative Feedback Design Theory (QFT)*. Boulder, Colorado: QFT Publications, 1993.

Revisión sistemática de la literatura en ingeniería de sistemas. Caso práctico: técnicas de estimación distribuida de sistemas ciberfísicos

Carmelina Ierardi, Luis Orihuela Espina, Isabel Jurado Flores,
Álvaro Rodríguez del Nozal, Alejandro Tapia Córdoba

{cierardi, dorihuela, ijurado, arodriguez, atapia}@uloyola.es

Resumen

Este artículo presenta una aplicación de una revisión sistemática de la literatura al ámbito de la ingeniería de sistemas. Se exponen de forma general los pasos a seguir y la metodología adoptada, que se inspira a las revisiones que se realizan en otros sectores. Se presentan las bases de datos más utilizadas en este área, cada una con sus ventajas y limitaciones. Se facilitan unos consejos para definir la función booleana y los criterios de inclusión y exclusión. Finalmente, el artículo propone algunas recomendaciones para extraer y sintetizar los datos y finalmente como crear el informe final. Se aplica esta metodología a un caso práctico, sobre las técnicas de estimación distribuida aplicadas a sistemas ciberfísicos.

Palabras clave: Revisión Sistemática, Ingeniería de sistemas, Estimación distribuida, Sistema ciberfísicos, Base de datos

1. Introducción

Hoy en día, con el desarrollo de nuevas tecnologías de la información y comunicación, la cantidad de información disponible y su facilidad de obtención, ha aumentado enormemente, lo cual implica quizás sorprendentemente, que es cada vez más difícil hacer una investigación precisa y selectiva sobre un tema específico para elaborar una revisión bibliográfica. La revisión sistemática de la literatura (RSL) se presenta en este contexto como una solución a este problema.

Los autores Kitchenham y Charters definen una RSL como un medio para evaluar e interpretar todas las investigaciones disponibles relevantes para una determinada pregunta de investigación, área temática o fenómeno de interés. Las RSL tienen como objetivo presentar una evaluación justa de un tema de investigación utilizando una metodología fiable, rigurosa y comprobable.

Una RSL es una forma de estudio secundario mientras que los estudios individuales, que contribuyen a la propia revisión sistemática, se denominan estudios primarios [3]. En resumen, la RSL

es un estudio muy útil cuando existe una pregunta concreta de investigación generalmente relacionada con diferentes temas, con varios estudios primarios, quizás con objetivos y/o resultados divergentes que pueden generar una incertidumbre sobre el proceso.

Muchas son las áreas en las cuales se utiliza esta metodología de forma común. Destacan el sector de la medicina, el de la psicología, el biológico, administración y contabilidad, economía, ingeniería de software y muchos más.

En el área de la ingeniería de sistemas y automática, se suelen hacer revisiones literarias sobre un tema concreto que no suelen seguir una determinada metodología, de forma que no permiten replicarse por otros autores o pueden estar sesgadas por el criterio del revisor. Normalmente, estas revisiones suelen estar hechas por investigadores de gran recorrido que aportan una visión global al tema en cuestión, como por ejemplo, las revisiones [2], [11] sobre el estado del arte en el control y en los sistemas ciberfísicos.

La metodología para elaborar la RSL que se utilizará en este trabajo, está basada en la guía propuesta por Kitchenham [3], aplicada a las áreas de ingeniería de software. El objetivo de esta investigación es explicar claramente las diferentes etapas a seguir para conseguir una RSL en ingeniería de sistema. Como contribución, esta investigación aporta algunas modificaciones a las líneas maestras antes referenciadas para adaptarlas a la ingeniería de sistemas: bases de datos propias de ingeniería, con el tipo de búsqueda que pueden hacerse, criterios de inclusión y exclusión adaptados, tipos de funciones de búsqueda booleanas.

Además, se expone en paralelo un caso práctico sobre la ejecución de una RSL sobre las técnicas de estimación distribuida de sistemas ciberfísicos.

Los sistemas ciberfísicos son sistemas complejos compuestos por entidades de distinta naturaleza que interactúan con un medio físico determinado, y que pueden tener simultáneamente capacidades de comunicación, computación y control, gracias a las cuales pueden involucrar seres humanos y animales. [4]. Se componen por un lado de un sis-

tema físico, en el que en general están presentes subsistemas heterogéneos, pudiendo incluir personas u otros seres vivos; por otro lado de sistemas empotrados, que son en general dispositivos que integran capacidades de medida, procesamiento y comunicación, y que de forma distribuida monitorizan y controlan los procesos físicos a través de redes de comunicación. Estas redes, en muchas ocasiones inalámbricas, hacen posible la estimación en tiempo real de las variables de un sistema ciberfísicos mediante técnicas de estimación [1], [6].

Este artículo está organizado como sigue. En la Sección 2 se presentan sumariamente los pasos de la RSL. La planificación de la revisión se expone en la Sección 3. Finalmente, las etapas para la realización y para el informe de la revisión están presentados, respectivamente, en las Secciones 4 y 5. Las conclusiones y trabajos pendientes se exponen en la Sección 6.

2. Revisión sistemática de la literatura

La mayoría de las investigaciones comienzan siempre con una revisión de la literatura para definir y enfocar el estado actual de la investigación. Principalmente, se utilizan la revisión narrativa (o tradicional) y la revisión sistemática. La primera es más apropiada cuando hay pocos estudios primarios sobre el tema de investigación y estos tienen importantes similitudes entre si. Se basa en la interpretación, el análisis y la discusión personal acerca de lo que han dicho otros autores. Sin embargo no se ajusta al paradigma científico, puesto que no informa sobre la cantidad de fuentes, ni de los métodos de búsqueda, no hace explícitos los criterios de inclusión/exclusión de los estudios, ni habla sobre la relevancia de los mismos con respecto al resto de la literatura, ni tampoco proporciona evidencias objetivas de los razonamientos, entre otros [9]. Por otro lado, la revisión sistemática como se ha mencionado, sigue una metodología científica, que vela por la objetividad, la rigurosidad y fiabilidad: sigue una estrategia de búsqueda predefinida para permitir evaluarla exhaustivamente [3].

Los principales objetivos que persigue una rigurosa RSL son [10]:

- Definir lo que se conoce sobre un tema, un concepto o un problema en general.
- Identificar lagunas y coherencias de la literatura pasada y actual sobre el tema elegido.
- Promover el desarrollo de protocolos y directivas que pueden servir como modelo.

Por todas estas razones, emprender una revisión sistemática conlleva un trabajo considerable para poder lograr un buen resultado. La preparación de una revisión comprende numerosas etapas resumidas en tres fases secuenciales:

1. Planificación de la revisión.
2. Realización de la revisión.
3. Informe de la revisión.

Estas fases, a su vez, pueden dividirse en sub-fases, tal y como ilustra la Figura 1. En las siguientes secciones se analizan con detalle.

3. Planificación de la revisión

Una vez definido el tema de investigación y una vez localizada la necesidad de iniciar una eficiente RSL es muy recomendable seguir las diferentes etapas que la constituyen. La fase más exigente y más significativa, por la influencia en los pasos posteriores, es la planificación de la revisión que se compone de: 1) Pregunta(-s) de investigación clara(-s) y precisa(-s); 2) Escoger las bases de datos a utilizar; 3) Establecer los criterios de inclusión y exclusión; 4) Definir la función booleana de la búsqueda.

3.1. Pregunta de investigación

Elegir el tema, delimitar el problema y enunciar con claridad la(-s) pregunta(-s) de investigación es fundamental a la hora de conducir la RSL. Es fundamental que el objetivo de la búsqueda sea coherente con la hipótesis formulada.

En muchos campos, como por ejemplo el de la psicología o medicina, existe una batería de preguntas que se utilizan para facilitar esta etapa. En estos sectores se considera también el uso de unos criterios para enmarcar las preguntas de investigación, como por ejemplo el criterio PICOC (Population, Intervention, Comparison, Outcome, Context) [3]. Este criterio incluye los siguientes conceptos:

Población: a quién se dirige el estudio (personas implicadas y/o interesadas)

Intervención: metodología, instrumento, tecnología, procedimiento empleado.

Comparación: se comparan las distintas intervenciones.

Resultados: solución relacionada con los factores más importantes.

Contexto: cuál es el contexto en el cual se entrega la intervención.

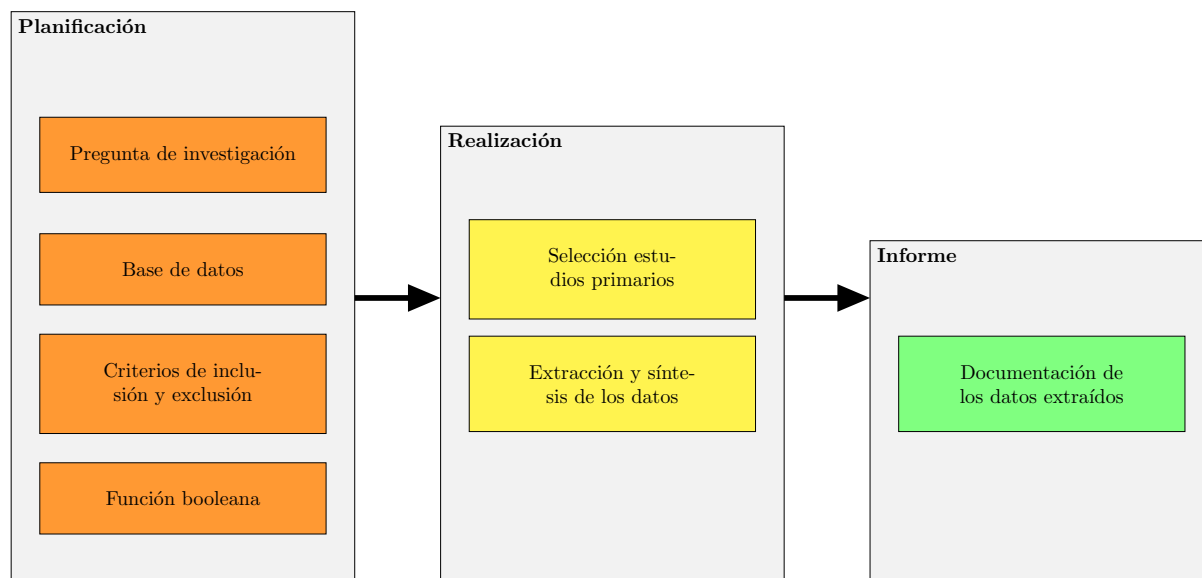


Figura 1: Fases y subfases de la revisión sistemática

Caso práctico

En el campo de la ingeniería de sistemas no resulta tan evidente formular una colección de cuestiones y/o criterios siguiendo el PICOC, ya que las áreas de investigación son muy diferentes entre ellas y no siguen particulares patrones.

El ejemplo que utilizaremos para ilustrar una revisión sistemática es el siguiente: técnicas de estimación distribuidas que se aplican sobre sistemas ciberfísicos. Para lograr este objetivo, se ha identificado la siguiente pregunta de investigación con sub-preguntas que se tratarían de responder con esta revisión:

RQ.1: ¿Qué técnicas de estimación distribuida se emplean en sistemas ciberfísicos, sistemas heterogéneos o sistema de sistemas?

RQ.1.1: ¿Qué limitaciones y ventajas tiene cada técnica?

RQ.1.2: En aplicaciones que incluyan humanos o animales ¿que estimador obtiene mejores resultados?

3.2. Bases de datos

La revisión se debe documentar con suficiente detalle para que los lectores puedan evaluar la exhaustividad de la búsqueda. Además, se deben especificar todas las bibliotecas digitales que se han consultado, las tipologías de publicación (revistas, conferencias, etc), el uso de búsquedas electrónicas o manuales o una combinación de ambas.

Para conseguir la mayor cobertura posible en el campo de la ingeniería de sistemas, se aconseja elegir entre las bases de datos listadas en la Ta-

bla 1. Con respecto a los campos de búsqueda que dichas bases de datos permiten, en esta tabla se han utilizado unos acrónimos, donde: A= “abstract”; T= título del artículo; K= palabras clave; F= texto completo. Dependiendo de la base de datos, el conjunto de “abstract”, título y keywords (A+T+K) se denomina de forma diferente: por ejemplo, en Web of Science este campo se nombra “Tema”; en IEEE Xplore, “Metadata”.

La estrategia de búsqueda puede ser diferente dependiendo de la base de datos elegida; pues algunas están más preparadas que otras para efectuar una búsqueda avanzada. Algunas de las bases de datos, como mostrado en la Tabla 1, dejan hacer directamente la búsqueda en determinados campos del texto (IEEE Xplore, Web of Science, ScienceDirect, Scopus), otras tienen la misma posibilidad pero resulta más intuitivo escribiendo manualmente la “search query” (ACM Digital Library) y otras no dejan delimitar la búsqueda a estos campos (SpringerLink, Wiley, Google Scholar). Algunas permiten escribir solo 15 términos para la búsqueda, otros no tienen límites. Casi todas las bases de datos admiten operadores, booleanos y de otro tipo. La Tabla 1 incluye los operadores que se pueden utilizar en cada base de datos y en la Tabla 5 se explicará con detalle el significado y el uso que se le da a cada uno de ellos.

Una diferencia sustancial se presenta en la descarga de las citas: algunas dejan descargar todo el historial de búsqueda de una vez, otros permiten descargar 200 / 100 / 50 citas a la vez, y otros solo 1 referencia a la vez. Se refleja también el formato en el que pueden descargarse los resultados, que es importante tener en cuenta si va

Tabla 1: Principales bases de datos en ingeniería de sistemas

Base de datos	Campos de búsqueda	Búsqueda manual o automática	Operadores admitidos	Nº Términos admitidos	Nº Descarga máxima	Formato citaciones	Citación con "abstract"
Web of Science	A+T+K, T, F	Ambas	AND, OR, NOT, NEAR, (), *, ^u	No especificado	50 citaciones	bib, RIS, CSV	SI
IEEE Xplore	A+T+K, T, A, K, F	Ambas	AND, OR, NOT, NEAR, (), *, ^u	Solo 15	100 citaciones	bib, RIS, CSV	SI
ScienceDirect	A+T+K, T, A, K, F	Ambas	AND, OR, AND NOT, (), *, ?, ^u , {}	No especificado	200 citaciones	RIS, bib, Text	SI
ACM Digital Library	T, A, K, F, A+T+K (manual)	Ambas	AND, OR, NOT, (), ^u	No especificado	2000 citaciones	bib, RIS, CSV	NO
Scopus	A+T+K, T, A, K, F	Ambas	AND, OR, AND NOT, *, ?, ^u , ()	No especificado	2000 citaciones	bib, RIS, CSV, Text	SI
SpringerLink	T, F	Automática	AND, OR, NOT, ^u , ()	No especificado	2000 citaciones	CSV	NO
Wiley Online Library	A, T, K, F	Automática	AND, OR, NOT, ^u , *, ()	No especificado	20 citaciones	bib, RIS, Text	SI
Google Scholar	T, F	Automática	AND, OR, NOT, ^u , ()	No especificado	1 citación	bib, RIS	NO

a usarse un gestor de referencias (Mendeley, BibDesk, etc.), pues cada uno de ellos trabaja con un formato de archivos diferente. Finalmente, la tabla indica qué información puede extraerse de la base de datos tras realizar una búsqueda. Algunas bases de datos sólo permiten descargar el título, mientras que otras nos permiten incluir también el abstract, facilitando tareas posteriores.

Caso práctico

Para el caso práctico que estamos utilizando no se han utilizado todas las bases de datos. Se ha decidido no incluir las base de datos que no permitían restringir la búsqueda a unos campos determinados (título, "abstract" y palabras clave del artículo). En la Tabla 2 se presentan los detalles de la búsqueda de las bases de datos elegidas, junto con los campos en los cuales se ha restringido la búsqueda y la fecha en la cual se ha efectuado.

Se destaca la base de datos ACM Digital Library, donde la búsqueda se ha efectuado manualmente, es decir que para limitar la búsqueda a los tres campos, se han usado los siguiente términos: recordAbstract, acmdlTitle, keywords.author.keyword.

3.3. Criterios de inclusión y exclusión

Una vez obtenidos los estudios potencialmente relevantes por cada base de datos elegida, se tiene que evaluar su adecuación real al tema de investigación.

Los criterios de selección del estudio pretenden identificar los estudios primarios que son aquellos con evidencia directa sobre la pregunta de investigación. Con el fin de reducir la probabilidad de

Tabla 2: Detalle de la búsqueda por cada base de dato utilizada

Base de datos	Limites	Fecha búsqueda
Web of Science	Tema	08/05/2017
IEEE Xplore	Metadata	08/05/2017
ScienceDirect	Título/ Abstract Keywords	08/05/2017
ACM Digital Library	Título/ Abstract Keywords	09/05/2017
Scopus	Título/ Abstract Keywords	09/05/2017

sesgo, los criterios de selección deben decidirse al principio, aunque pueden ser refinados durante el proceso de búsqueda.

Existen dos tipos de criterios, exclusión y inclusión. El primero indica que si el artículo presenta uno de los puntos contenido en este criterio se excluirá. El segundo involucra todas las características que cada artículo elegido tiene que tener.

Como se explicará más adelante, las personas involucradas en una RSL tienen que ser al menos 2. Por esta razón, los criterios deben ser claros para asegurar que puedan ser interpretados de manera fiable y que clasifiquen los estudios correctamente. Muchos de estos criterios son comunes a todas las RSL, como por ejemplo el idioma de los artículos, el número mínimo de páginas, etc [3], [7].

Caso práctico

En las Tablas 3 y 4 se enumeran los criterios elegidos para la selección de un artículo. Para que un artículo sea elegido tiene que presentar todas las características de los criterios de inclusión de

la Tabla 3 y además no tiene que presentar ningunas características de los criterios de exclusión de la Tabla 4. Los denominados estudios secundarios y la literatura gris incluyen libros o capítulos de libro, presentaciones en póster, resúmenes y revisiones, artículos de congreso que han dado lugar a artículos de revista, tesis doctorales, actas de los congresos.

En ingeniería de sistemas, como criterios comunes se podría añadir si en el estudio se presentan experimentos y/o simulaciones; si propone o simplemente se utiliza una determinada técnica, etc.

Tabla 3: Criterios de inclusión

- Estudios primarios
- Artículo disponible online
- Usar o proponer una técnica de estimación distribuida sobre sistemas ciberfísicos, sistemas heterogéneos o sistema de sistemas
- Usar, por lo menos, uno de los siguientes estimadores distribuidos: filtro de Kalman, filtro de partícula, filtro H_∞
- Hacer específicamente referencia a humanos o animales

Tabla 4: Criterios de exclusión

- Estudio secundario y literatura gris
- Artículo corto (≤ 3 páginas)
- Artículo cuyo idioma no es el inglés o el español
- Texto no disponible (a través de los motores de búsqueda o poniéndose en contacto con los autores)
- Estudio duplicado
- Estudio claramente irrelevante para la investigación
- Focalizado solo en el control del sistema
- No presenta experimentos o simulaciones del estimador

3.4. Función booleana

La búsqueda se inicia con una formulación adecuada de las palabras clave de la función booleana y con la investigación en las bases de datos electrónicas de cada sector. Para refinar la búsqueda y desarrollar una mejor estrategia, sería mejor antes identificar sinónimos, acrónimos, palabras truncadas y/o términos alternativos a los que se han utilizado, para garantizar que la referencia encontrada es independiente de sinónimos, variantes, etc.

Identificados los conceptos sobre los que se desea obtener información y establecida una relación lógica de los términos que los van a representar (se podrán utilizar diccionarios terminológicos, variantes ortográficas, abreviaturas y términos relacionados), se puede crear la función booleana.

La función booleana representa una cadena formada por varias combinaciones de términos de búsqueda derivados de la pregunta de investigación. Una vez encontradas las palabras claves que describen el tema de investigación, se utilizan los operadores booleanos para combinar los distintos términos. Finalmente, se lanza la estrategia de búsqueda y se revisa el resultado obtenido. Si fuese necesario, se modifica la búsqueda y se vuelve a lanzar. En este punto conviene disponer de una serie de trabajos o artículos clave que, o bien sabemos que deben estar incluidos en los resultados o bien sabemos que no debería estarlo. Esto nos permite tener una cierta confianza en la eficacia de la búsqueda realizada.

Los principales operadores utilizados son AND, OR, NOT, “ ”, *, ?, () pero no todas las bases de datos los admiten y utilizan de la misma manera (Tabla 1). En la Tabla 5 se detalla la función de cada uno de los operadores.

Tabla 5: Operadores utilizados

Operador	Función
AND	se incluyen todos los términos de búsqueda especificados
OR	se incluye cualquiera o todos los términos especificados
NOT	se incluye el primer término de búsqueda pero no el segundo
“ ”	para buscar una frase exacta
*, ?	para truncar una palabra
()	delimitar subconjuntos de la búsqueda

Caso práctico

Muchos de estos operadores se han utilizado para la función booleana elegida para este estudio, y que se presenta a continuación:

(Estimator OR Estimation OR Filter OR Filtering OR Observer OR Observability OR Sensing) AND

(“Cyber Physical System” OR “Human in the loop” OR “Human Robot” OR “System of systems” OR “Heterogeneous System” OR “Human Machine” OR “Canine Machine” OR “Heterogeneous Multiagent System” OR “Humanoid Robot” OR “Animal Ro-

bot”) AND

(Distributed OR Decentralized OR Decentralised OR “Sensor Fusion”)

En la Tabla 6 se muestran los resultados de la búsqueda obtenida poniendo la función booleana hallada en las diferentes bases de datos elegidas, aplicando el filtro en los siguientes campos: título, “abstract” y palabras clave. Se han obtenido 1788 referencias.

Tabla 6: Referencias obtenidas por cada base de dato utilizada

Base de datos	Referencias totales
Web of Science	221
IEEE Xplore	727
ScienceDirect	40
ACM Digital Library	223
Scopus	577
	1788

4. REALIZACIÓN DE LA REVISIÓN

Obtenidos los resultados por cada base de datos, se tendrán que analizar y evaluar para verificar si realmente son buenos candidatos para la realización de la revisión. El primer filtro será la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión citados en la Subsección 3.3. En una primera inspección, se aplicarán los criterios al título y “abstract”. Sólo cuando haya dudas de si incluirlo o no, se realizará una lectura a texto completo.

4.1. Selección de estudios primarios

La búsqueda no tendrá que incluir ni estudios secundarios (review, survey), ni literatura gris compuesta por informes técnicos, actas de congresos, tesis doctorales, presentaciones en póster, libros o capítulos de libros, véase, como ejemplo los criterios de inclusión (Tabla 3) y exclusión (Tabla 4). La mayoría de las bases de datos permiten efectuar directamente este primer filtrado, no incluyendo algunos o todos los estudios secundarios.

Los artículos incluidos serán solo los publicados en revistas y en congresos que no hayan dado lugar a posteriores artículos de revista.

Un grupo internacional de expertos ha desarrollado el método PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses), que constituye una guía para la realización de RSL [5], [7]. Se compone de 27 puntos y un diagrama

de flujo en cuatro etapas, representado en Figura 2; representan el resumen del proceso de selección.

Los resultados serán evaluados, por dos personas distintas, considerando solo el título y el “abstract” de cada uno. Solo en el caso en el que las dos personas afirmen que un artículo sea adecuado, éste pasa a la etapa siguiente. Si están en desacuerdo, una tercera persona tendrá la facultad de decidir. De este modo se reduce considerablemente la cantidad de artículos considerados idóneos. El siguiente paso es la lectura completa del texto, haciéndose una última reducción. Esta es la metodología que se utilizará para esta investigación, pero existe otra, muy usada en la literatura, que asigna a cada artículo una nota entre 0 (no relacionado con el tema) y 1 (muy relacionado con el tema), con un paso de 0.25 o 0.5, a elección de los revisores: si la nota final, que es la media entre las notas de cada revisor, es superior a un umbral prefijado, entonces el artículo se acepta, en caso contrario se rechaza.

Caso práctico

Para la búsqueda efectuada en este trabajo resultan 892 artículos incluidos (Tabla 7). En esta misma tabla se muestran los detalles de la selección de estudios primarios para la investigación de este trabajo. Se quiere evidenciar la gran cantidad de duplicados encontrados en las distintas bases de datos, que resultan más de 600. Esto es porque las distintas base de datos comparten muchas de las revistas y conferencias en el campo de la ingeniería de sistemas. La herramientas automáticas de detección de duplicados ha sido Mendeley.

Para este primer cribado se han utilizado solo algunos de los criterios de exclusión (se han descartado los estudios secundarios, la literatura gris y los duplicados). El resto de los criterios de exclusión y los criterios de inclusión son realmente las tareas que serían necesarias desarrollar entre las 2 personas y que, para el caso particular, está pendiente.

4.2. Extracción y síntesis de los datos

La validez de una RSL está estrechamente relacionada con la calidad de los estudios originales y con los métodos utilizados por los revisores para organizar y sistematizar la información útil para la revisión. Existen diferentes sistemas que ayudan a organizar la información recogida, entre las más usadas están los mapas conceptuales o las tablas de extracción de datos donde se encuentran resumidas las componentes más características del estudio. La información básica que estas tablas deben contener son [3]:

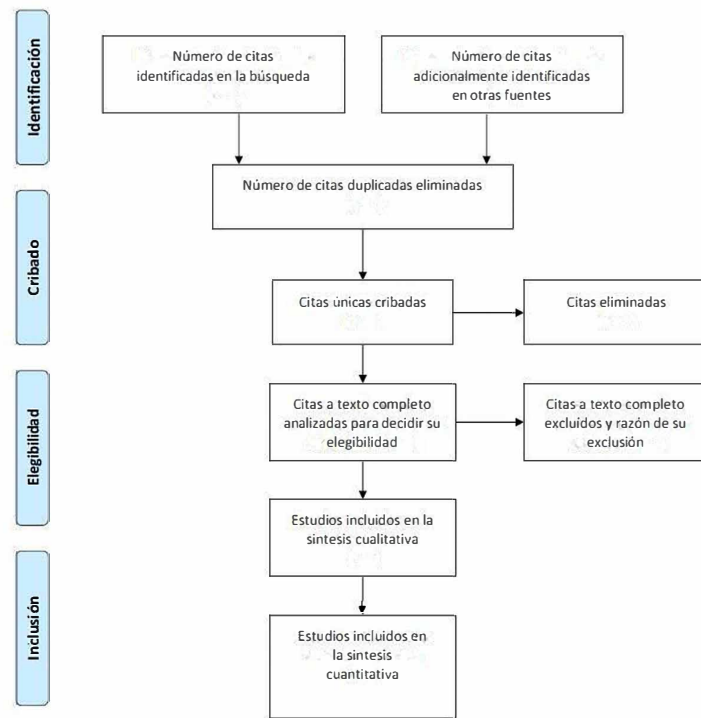


Figura 2: Diagrama de flujo del método PRISMA

Tabla 7: Resultados obtenidos por cada base de dato utilizada y resultados obtenidos después del primer cribado

Base de datos	Referencias totales	Referencias seleccionadas
Web of Science	221	214
IEEE Xplore	727	696
ScienceDirect	40	35
ACM Digital Library	223	165
Scopus	577	457
	1788	1567
Quitando los duplicados		892

- Información general: título, autor, año de publicación, revista a la cual pertenece, etc.
- Características del estudio: objetivo, contexto;
- Incidencia;
- Resultados obtenidos;
- Observaciones: notas y reflexiones.

5. Informe de la revisión

La fase final de la RSL incluye la elaboración y la redacción de todos los resultados. Como ya se

ha mencionado, la revisión no tiene que ser una simple descripción de lo que otros autores han publicado, sino una discusión crítica, objetiva y razonada de la literatura examinada, mostrando una profunda comprensión y conciencia de las diferentes argumentaciones y enfoques.

5.1. Documentación de los datos extraídos

Una vez organizada la revisión, completados los mapas y/o tablas (Figura 2), se tendrá una visión completa del conjunto del material y una orientación respecto a la articulación lógica de las relaciones entre los diferentes resultados. Entre otras cosas, este proceso facilita la organización de los contenidos y en particular, la selección de la información clave, explicitando sobre qué conceptos se deben desarrollar en la revisión.

La realización del documento tiene que recopilar todos los aspectos citados en la Sección 4.2, utilizando toda la información básica disponible en cada artículo que sea importante para la revisión, resaltando las características del estudio y los resultados obtenidos.

La RSL se concluye argumentando los resultados, es decir, se explica y propone una interpretación de los datos más significativos relacionadas con el tema.

El informe de resultados finales, tendrá que contestar de manera clara y precisa a las preguntas de investigación propuesta al principio. Algunos autores plantean esta última parte desarrollando cada pregunta con sus respectivas soluciones o bien se puede argumentar en el completo sin necesariamente utilizar esta subdivisión [12], [8].

6. Conclusiones

En este trabajo se han presentado las etapas principales de una RSL para ingeniería de sistemas. Se ha presentado un caso práctico sobre las técnicas de estimación distribuida de sistemas ciberfísicos. Queda pendiente completar la extracción y síntesis de los datos y finalmente redactar el informe, que se proponen como trabajo futuro.

Concluyendo, en la investigación futura se pretende proporcionar una investigación sobre la evolución de estas técnicas desde los años 90' hasta el 2017 con el fin de mejorar la comprensión y aclarar la trayectoria evolutiva identificando las tendencias teóricas y las lagunas que deben abordarse en estudios futuros.

Agradecimientos

Los autores agradecen a AEI/FEDER (TEC2016-80242-P) por financiar este trabajo.

Referencias

- [1] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarabramanian, and Erdal Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, 38(4):393–422, 2002.
- [2] Karl J Åström and P R Kumar. Control: A perspective. *Automatica*, 50:3–43, 2014. doi: 10.1016/j.automatica.2013.10.012.
- [3] Barbara Kitchenham and Stuart Charters. Guidelines for performing Systematic Literature reviews in Software Engineering. *Engineering*, 2007. doi: 10.1145/1134285.1134500.
- [4] Edward A. Lee. Cyber Physical Systems: Design Challenges. *Proc. of 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC'08)*, pages 363–369, 2008. ISSN 1555-0885. doi: 10.1109/ISORC.2008.25.
- [5] Alessandro Liberati, Jennifer Tetzlaff, Douglas G Altman, Prisma Group, et al. Prisma statement per il reporting di revisioni sistematiche e meta-analisi degli studi che valutano gli interventi sanitari: spiegazione e elaborazione. *Evidence*, 6(7):e1000115, 2015.
- [6] Bowen Lu, John Oyekan, Dongbing Gu, Huosheng Hu, and Hossein Farid Ghassem Nia. Mobile sensor networks for modelling environmental pollutant distribution. *International Journal of Systems Science*, 42(9): 1491–1505, 2011.
- [7] David Moher, Alessandro Liberati, Jennifer Tetzlaff, Douglas G Altman, Prisma Group, et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the prisma statement. *PLoS med*, 6(7):e1000097, 2009.
- [8] Daniela Quiñones and Cristian Rusu. Computer Standards & Interfaces How to develop usability heuristics : A systematic literature review. *Computer Standards & Interfaces*, 53 (March):89–122, 2017. ISSN 0920-5489. doi: 10.1016/j.csi.2017.03.009.
- [9] Jorge Ivan Rave Perez. Revisión sistemática de literatura en ingeniería como apoyo a la consultoría basada en investigación. *Universidad Ciencia y Tecnología*, 17(66), 2013.
- [10] Valeria Sala, Lorenzo Moja, Ivan Moschetti, Sabrina Bidoli, Vanna Pistotti, and Alessandro Liberati. Revisioni sistematiche-breve guida all'uso. 2006.
- [11] J. Shi, J. Wan, H. Yan, and H. Suo. A survey of cyber-physical systems. In *2011 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, pages 1–6, Nov 2011. doi: 10.1109/WCSP.2011.6096958.
- [12] Jéssyka Vilela, Jaelson Castro, Luiz Eduardo, G Martins, and Tony Gorschek. The Journal of Systems and Software Integration between requirements engineering and safety analysis : A systematic literature review. 125:68–92, 2017. doi: 10.1016/j.jss.2016.11.031.

Desarrollo de un Controlador Predictivo para Autómatas programables basado en la normativa IEC 61131-3

Pablo Krupa, Daniel Limón, Teodoro Álamo

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Sevilla. España

E-mails: pabkrugar@alum.us.es, dlm@us.es, talamo@us.es

Resumen

En este trabajo se describe la implementación de un Controlador Predictivo (MPC) en un Autómata Programable (PLC) a través de una librería en MATLAB. La librería toma los datos del sistema y los parámetros del MPC y genera con ello el código del controlador de forma que se minimice el uso de memoria del PLC. El código generado se empaqueta en un archivo que puede ser directamente importado al software de control del PLC. El lenguaje de programación de dicho código sigue la normativa IEC 61131-3. En concreto, el controlador está programado con el lenguaje ST.

El controlador incluye un observador de estado y un estimador de perturbaciones, un Steady State Target Optimicer (SSTO), un predictor en bucle abierto y posibilidad de trabajar en modo manual.

Este trabajo proporciona una metodología, basada en el algoritmo FISTA, para resolver el problema de optimización requerido para la implementación del controlador MPC.

En este trabajo también se muestran los resultados de pruebas realizadas sobre el uso de memoria del PLC para sistemas de distintos tamaños, así como un ejemplo de uso del controlador aplicado en el PLC Modicon m340, de la empresa Schneider Electric. El software de control del PLC que ha sido usado, y para el que está programada la librería de MATLAB, es Unity Pro XL.

Palabras clave: Control Predictivo, Autómata Programable, FISTA, IEC 61131-3, Generación de código.

1. Introducción

El Control Predictivo (MPC) es una estrategia de control basada en optimización, que resulta de gran utilidad para el control de sistemas multivariables con restricciones [3]. Esta estrategia de control es usada en numerosos sectores industriales, tales como refinerías de petróleo, plantas eléctricas o la industria química. Sin embargo, su implementación ha estado enfocada a sistemas con muchos recursos, tales como un PC, dada su complejidad

y gran demanda computacional.

En los últimos años la comunidad científica ha hecho avances en la programación de Controladores Predictivos en equipos con menos recursos que un PC, tales como Arduino, FPGA o PLC. Los Autómatas Programables (PLC) son los equipos más extendidos en la industria para la implementación de lazos de control. Se caracterizan por su robustez, fiabilidad, sistema de comunicación integrado y facilidad de programación. Sin embargo, son equipos con limitaciones en cuanto a capacidad computacional o de memoria en comparación con los de un PC. La estrategia de control PID es la que se suele implementar en estos equipos. En [7] y [2] se muestran casos de estudio realistas en los que se implementa un MPC en un PLC, y en [6] se muestran consideraciones prácticas sobre la implementación de un MPC en un PLC.

En [10] se muestra la implementación de un MPC en un PLC haciendo uso de la normativa IEC 61131-3, al igual que en este trabajo. Esta implementación hace uso de funciones que resuelven el problema de optimización del MPC en función de las matrices resultantes del mismo. Este enfoque, a pesar de estar orientado a implementación en un PLC, no aprovecha la estructura del problema para reducir la memoria necesaria, lo cual es de especial importancia en los PLC dadas sus limitaciones de memoria. Para ilustrar esto, mencionar que el tamaño de la memoria dedicada a datos del PLC usado en este trabajo tiene un tamaño de 4Mb.

Uno de los principales avances en la implementación del MPC en sistemas con pocos recursos son los avances en algoritmos que resuelvan de forma rápida y eficiente problemas de programación cuadrática (QP), dado que el problema de optimización del MPC, cuya resolución proporciona la acción de control, es un problema de este tipo. Estos avances han dado lugar a la creación de diversas librerías de generación de código para la resolución eficiente de problemas QP, tales como: FiOrdOs [12], CVXGEN [9] o μ AO-MPC [13]. Este enfoque proporciona un código más eficiente, tanto en memoria como en complejidad, que el enfoque del párrafo anterior.

Sin embargo, las librerías previamente mencionadas generan algoritmos genéricos para la resolución de problemas QP en código C/C++, que no son directamente trasladables a una implementación en PLC. La contribución de este trabajo es la creación de una librería que genera un código específicamente diseñado para optimizar la memoria de la formulación de MPC que se muestra en la Sección 2 y programada en el lenguaje de programación estándar de los autómatas programables ST. Este lenguaje está recogido bajo la normativa IEC 61131-3, que regula los estándares de los lenguajes de programación de los autómatas programables. La librería aprovecha la estructura del problema de optimización que se deriva del MPC y del algoritmo FISTA [1], que es el que se usa para obtener su solución.

Además, la librería genera un controlador que posee una serie de características necesarias para su implementación en el entorno industrial, tales como: control multivariable, modo manual y automático, cancelación de offset, optimización de consigna, restricciones en entrada y estado, realimentación de salida y compensación de retardo de la planta.

La salida de la librería es un archivo de extensión ".XDB" que se puede importar directamente al software de control de PLCs *Unity Pro XL*, de la empresa Schneider Electric, generándose un bloque FBD. Todas las pruebas que se han realizado en este trabajo han sido en este software o directamente en un PLC modelo Modicon m340, de la misma empresa.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: la formulación del MPC se muestra en la Sección 2, el algoritmo FISTA se muestra en la Sección 3, la arquitectura del controlador, incluyendo una breve descripción de cada uno de los elementos auxiliares, se muestra en la Sección 4, la explicación de la librería en MATLAB se encuentra en la Sección 5, un ejemplo de aplicación del controlador se muestra en la Sección 6, los resultados sobre uso de memoria en función del tamaño del problema se muestran en la Sección 7, y la conclusión y comentarios adicionales se muestran en la Sección 8.

2. Formulación del MPC

El MPC controla un sistema modelado por ecuaciones discretas en variables de estado obtenido a partir de la linalización del sistema en torno a un punto de funcionamiento (X_0, U_0, Y_0) .

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (1a)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (1b)$$

Donde $x(k) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estado, $u(k) \in \mathbb{R}^m$ es el vector de acciones de control e $y(k) \in \mathbb{R}^p$ es el vector de salidas del sistema. $x(k)$, $u(k)$ e $y(k)$ son variables incrementales respecto al punto de funcionamiento (X_0, U_0, Y_0)

Se definen restricciones en caja para el estado y para las acciones de control de la siguiente forma.

$$LB_x \leq x(k) \leq UB_x \quad (2)$$

$$LB_u \leq u(k) \leq UB_u$$

La ley de control del MPC se deriva de la resolución del siguiente problema de optimización.

$$J^* = \min_u J(x, u, x_r, u_r) \quad (3)$$

$$s.a. \quad x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \quad (3a)$$

$$LB_x \leq x(k) \leq UB_x, \quad (3b)$$

$$LB_u \leq u(k) \leq UB_u, k = 0, \dots, N-1 \quad (3c)$$

$$x(0) = X \quad (3d)$$

$$x(N) = x_r \quad (3e)$$

Siendo $J(x, u, x_r, u_r)$ la función de coste, cuya expresión es la siguiente.

$$J = \sum_{i=0}^{N-1} \|x(i) - x_r\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N-1} \|u(i) - u_r\|_R^2 \quad (4)$$

donde N es el horizonte de predicción, u es la secuencia de N acciones de control futuras, x la secuencia de N estados futuros predichos del sistema, $x_r \in \mathbb{R}^n$ es el estado de referencia, $u_r \in \mathbb{R}^m$ es la acción de control de referencia, X es el estado leído en el periodo de muestreo actual, y $Q \in \mathbb{R}^{n \times n} \succ 0$ y $R \in \mathbb{R}^{m \times m} \succ 0$ son matrices diagonales que penalizan la discrepancia entre x y x_r , y entre u y u_r , respectivamente.

3. Algoritmo FISTA

Considérese el problema QP siguiente.

$$\min_z \frac{1}{2} z' H z + f' z \quad (5)$$

$$s.a. \quad z \in \mathcal{Z} \quad (5a)$$

$$Az = b \quad (5b)$$

donde $z \in \mathbb{R}^{n_z}$ son las variables de decisión, el conjunto $\mathcal{Z} = \{z \in \mathbb{R}^{n_z} : LB \leq z \leq UB\}$, H es una matriz diagonal definida positiva, $A \in \mathbb{R}^{m_z \times n_z}$, con $n_z > m_z$, y $[A \ b]$ es de rango m_z .

Nótese que el problema de optimización del MPC (3) se puede reescribir de esta forma. Tomando,

$$z = [x(0)', u(0)', \dots, x(N-1)', u(N-1)']'$$

La solución en línea de este problema QP se ha realizado mediante el algoritmo FISTA [1], que es un algoritmo basado en gradiente que resuelve el problema mediante teoría de dualidad. A continuación se muestran los conceptos básicos de este algoritmo y su formulación.

Defínase,

$$J(z) = \frac{1}{2} z' H z + f' z \quad (6)$$

$$L(z, \lambda) = J(z) - \lambda'(Az - b) \quad (7)$$

$$z(\lambda) = \arg \min_{z \in \mathbb{Z}} L(z, \lambda) \quad (8)$$

$$f(\lambda) = L(z(\lambda), \lambda) \quad (9)$$

La función $L(z, \lambda)$ se denomina la función Lagrangiana del problema, λ es el multiplicador de Lagrange y $f(\lambda)$ es la función dual.

Sea z^* la solución óptima del problema original y J^* el coste óptimo, entonces

$$J^* = L(z^*, \lambda) \geq f(\lambda) \quad (10)$$

para todo λ , pues $Az^* - b = 0$. Por lo tanto la función dual es una cota inferior del problema de optimización. El objetivo es pues obtener la mejor cota inferior, maximizando la función dual, es decir, resolviendo el problema

$$\lambda^* = \arg \max_{\lambda} f(\lambda) \quad (11)$$

Definiendo $f^* = f(\lambda^*)$, se puede demostrar que el problema anterior posee la propiedad de dualidad fuerte, es decir, $J^* = f^*$ y $z^* = z(\lambda^*)$.

Para el problema QP (5), en el que H es diagonal y definido positivo, el cálculo de $z(\lambda)$ tiene una solución explícita directa, puesto que es equivalente a la resolución de n_z problemas de optimización desacoplados de una sola variable.

$$z(\lambda) = \arg \min_{z \in \mathbb{Z}} \frac{1}{2} z' H z + (f - A' \lambda)' z \quad (12)$$

El objetivo es obtener la mejor cota inferior de $z(\lambda)$, maximizando la función dual, cuya obtención se basa en la siguiente desigualdad. Esta desigualdad se cumple si $H \succ 0$.

$$f(\lambda + \Delta \lambda) \geq f(\lambda) - \Delta \lambda'(Az(\lambda) - b) - \frac{1}{2} \Delta \lambda' W \Delta \lambda \quad (13)$$

Con

$$W = A' H^{-1} A \quad (14)$$

La obtención de la desigualdad (13) así como su demostración no se detallan en este trabajo. Como

referencia para la obtención de esta desigualdad se citan los trabajos de Rockafellar [11] y Fletcher [5].

Nótese que

$$\arg \max_{\Delta \lambda} -\Delta \lambda'(Az(\lambda) - b) - \frac{1}{2} \Delta \lambda' W \Delta \lambda = \quad (15)$$

$$\arg \min_{\Delta \lambda} \Delta \lambda'(Az(\lambda) - b) + \frac{1}{2} \Delta \lambda' W \Delta \lambda$$

Y, dado que W es invertible, por ser H diagonal y A de rango completo por filas, el óptimo del problema (15) se alcanza en el punto en el que se anula el gradiente, es decir,

$$Az(\lambda) - b + W \Delta \lambda = 0 \quad (16)$$

Llegando finalmente a,

$$\Delta \lambda = -W^{-1}(Az(\lambda) - b) \quad (17)$$

Los pasos del algoritmo FISTA se detallan en Algoritmo 1, donde TOL es un parámetro de entrada del algoritmo.

Algoritmo 1 FISTA

- 1: $k = 1, \lambda_1 = \eta_1 = 0, t_1 = 1$
 - 2: Repetir
 - a: Obtener $z(\lambda_k)$ resolviendo (12)
 - b: $\Delta \lambda = -W^{-1}(Az(\lambda_k) - b)$
 - c: $\eta_k = \lambda_k + \Delta \lambda$
 - d: $t_{k+1} = \frac{1}{2}(1 + \sqrt{1 + 4t_k^2})$
 - e: $\lambda_{k+1} = \eta_k + \frac{t_k - 1}{t_{k+1}}(\eta_k - \eta_{k-1})$
 - f: $k = k + 1$
 - 3: Hasta que $|Az(\lambda_k) - b| \leq TOL$
-

4. Arquitectura del controlador

El controlador que se muestra en este trabajo obtiene la acción de control a partir del MPC descrito en la Sección 2, pero también incluye una serie de elementos auxiliares que proporcionan al controlador una serie de características adicionales: cancelación de offset, estimación de estado, control de sistemas con retardo, SSTO y modo manual de funcionamiento.

La arquitectura del controlador se muestra en la Figura 1, donde el objetivo de control es llevar la salida del sistema y a la referencia dada y_r .

A continuación se explican cada uno de los bloques auxiliares.

4.1. Observador de estado y estimador de perturbaciones

Con el objetivo de eliminar el error en régimen permanente ante referencias asintóticas a una

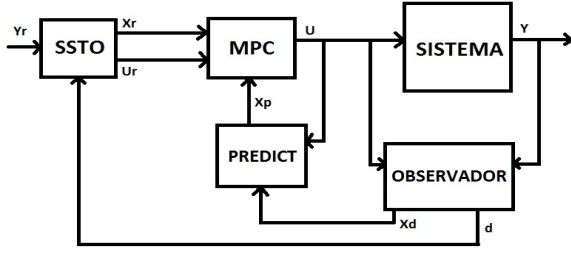


Figura 1: Arquitectura del controlador

constante, se ha incluido un observador de estado de Luenberger y un estimador de perturbaciones, que se usa para estimar y predecir la discrepancia entre la salida medida del sistema y la predicha. De este bloque se obtiene, en cada tiempo de muestreo, un estado estimado $x_d \in \mathbb{R}^n$ y una perturbación estimada $d \in \mathbb{R}^p$, que se usan para iniciar el problema del MPC (3) y el del SSTS (20).

La formulación de este bloque es la siguiente.

$$x_d^+ = Ax_d + Bu + L_x(y - Cx_d - D_d d) \quad (18)$$

$$d^+ = d + L_d(y - Cx_d - D_d d) \quad (19)$$

Donde A , B y C son las matrices del modelo del sistema (1), L_x , L_d y D_d matrices que se eligen para que el estimador sea estable, u la acción de control actual e y la salida medida del sistema.

La demostración sobre la convergencia de la salida del sistema y a la referencia dada y_r se puede ver en [8], donde en este caso se está considerando el caso $n_d = p$ y B_d matriz nula.

En la práctica, se toma $D_d = I_p$ y L_x , L_d de forma que el estado estimado x_d converja en un tiempo significativamente inferior al tiempo característico del sistema.

4.2. Predictor en bucle abierto

Con el objetivo de poder controlar sistemas con grandes retrasos de forma eficiente, es decir, sin tener que aumentar el estado del sistema, se añade un bloque que toma el estado estimado x_d , proporcionado por el observador de estado, y el historial de acciones de control pasadas - en un horizonte igual al retraso del sistema ret , dado en término del número de tiempos de muestreo de retraso - y devuelve el estado predicho x_p en ret tiempos de muestreo.

Por lo tanto, la ecuación (3d) se sustituye por $x(0) = x_p$.

4.3. Steady State Target Optimizer

El Steady State Target Optimizer (SSTS) calcula un punto de funcionamiento de referencia (x_r, u_r) a partir de una referencia en salida y_r , de tal forma que se minimice un cierto criterio. El SSTS transforma una referencia en términos de salida del sistema, que es la más habitual en la práctica, a la mejor referencia alcanzable en términos de estado x_r y acción de control u_r , de tal forma que el conjunto (x_r, u_r) cumple las restricciones del sistema (2).

El conjunto (x_r, u_r) se obtiene en cada tiempo de muestreo de la resolución del problema de optimización (20), que se ha diseñado de tal forma que el hessiano del problema QP que se deriva de él sea diagonal y definido positivo. De esta forma se puede aplicar el algoritmo FISTA (Sección 3) y las mismas técnicas de ahorro de memoria que se han usado para el MPC (Sección 2). El SSTS hace uso de la perturbación estimada por el estimador de perturbaciones (18) y (19). De esta forma la referencia (x_r, u_r) proporcionada por el SSTS será tal que la salida del sistema converja a la referencia dada en régimen permanente, siempre y cuando la referencia converja a un valor constante de forma asintótica.

$$(x_r, u_r) = \arg \min_{x_r, u_r} S(y_r, d) \quad (20)$$

$$s.a. \quad x_r = Ax_r + Bu_r \quad (20a)$$

$$y_r - D_d d = Cx_r + h \quad (20b)$$

$$LB_x \leq x_r \leq UB_x \quad (20c)$$

$$LB_u \leq u_r \leq UB_u \quad (20d)$$

Con

$$S(y_r, d) = \|x_r\|_{Q_r}^2 + \|u_r\|_{R_r}^2 + \|h\|_{T_h}^2 \quad (21)$$

Donde las matrices Q_r , R_r y T_h ponderan el estado de referencia, la acción de control de referencia y la variable de holgura h , respectivamente. Las tres matrices son diagonales y definidas positivas.

4.4. Modo de funcionamiento manual

El controlador posee un modo de funcionamiento manual, en el que la acción de control aplicada sobre el sistema es directamente la proporcionada por el usuario. En caso de estar activo el modo manual, el controlador solo ejecuta el observador de estado y estimador de perturbaciones.

En general, el controlador será iniciado en modo manual, se aplicará una acción de control que lleve al sistema a un punto de equilibrio y una vez que está en dicho punto de equilibrio y el observador de estado haya convergido se activará en modo de control automático.

5. Librería en MATLAB

Como se ha mencionado en la introducción, hay dos enfoques a la hora de implementar un MPC en un PLC. La primera, [10], implementa una función genérica de resolución de problemas QP a la que se le pasan las matrices de dicho problema. Esta solución no optimiza el uso de memoria, por lo que resulta inviable para problemas de gran tamaño. Por otro lado, existen aplicaciones orientadas a resolver problemas QP de forma eficiente a través de generación de código ([12], [9] o [13], por ejemplo). Sin embargo, estas aplicaciones generan código en C/C++ y no están orientadas a ningún problema QP en particular. Además, únicamente resuelven el problema QP, pero no proporcionan un controlador propiamente dicho.

En este trabajo se presenta una librería en MATLAB que genera controladores predictivos aprovechando la estructura que presenta el problema para la formulación del MPC mostrada en la Sección 2 y para el algoritmo FISTA (Sección 3). La especialización de la librería a una formulación concreta permite la optimización del problema QP resultante en mayor medida. Se busca minimizar la cantidad de memoria necesaria así como la cantidad de operaciones que se deben realizar en cada iteración del algoritmo FISTA. Además, se genera un controlador con todos los elementos auxiliares descritos en la sección 4 y programado en el lenguaje ST, según la normativa IEC 61131-3, que es un lenguaje estándar de los PLC.

La librería toma como datos las matrices del modelo del sistema y los parámetros del controlador, realiza una serie de cálculos fuera de línea para la generación de ciertas matrices y parámetros del problema y finalmente genera el controlador en forma de un archivo de extensión “.XDB”. Este archivo contiene la declaración de variables y el código del controlador y puede ser directamente importado a Unity Pro XL. Al ser importado se crea un bloque FBD (Figura 2). Sus entradas son la salida leída del sistema Y_{sys} , la referencia de salida YR , el valor de la acción de control en modo manual UM - en valor absoluto, el Booleano $MANUAL$ para indicar si trabajar en modo manual o automático y el valor del tiempo de muestreo ST . El bloque devuelve el valor de la acción de control del periodo de muestreo actual UK , que se obtiene de la resolución del problema (5).

El ahorro en memoria se obtiene mediante el aprovechamiento de la estructura que presentan las matrices requeridas para la resolución del algoritmo FISTA. Por ejemplo, la matriz A de (5b) presenta una estructura en banda compuesta únicamente por las matrices del modelo del sistema

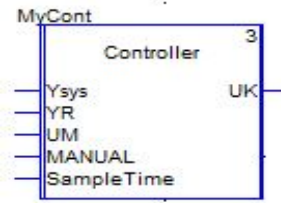


Figura 2: Bloque FBD en Unity Pro XL

(1). Por tanto, no se guarda en memoria la matriz A completa, sino únicamente las matrices del modelo. La multiplicación de A con otras matrices o vectores se realiza mediante bucles que recorren su estructura. Este mismo planteamiento se realiza para el resto de matrices y vectores del algoritmo FISTA: W (14), H , f y b (5).

Como ejemplo del orden de ahorro de memoria véase la matriz A , cuyo número de variables es igual a $N(N+1)n(n+m)$, mientras que el número de variables necesarias usando la librería es $n(n+m)$, ya que únicamente hay que almacenar las matrices A y B del modelo del sistema (1). Esto mismo ocurre de forma muy similar con el resto de matrices y vectores del problema (si bien el contraste no es tan pronunciado en el caso de los vectores).

6. Ejemplo de aplicación

En esta sección se muestra un ejemplo de uso del controlador en *Unity Pro XL*. El sistema a controlar consta de cuatro tanques de agua, dos de ellos situados encima de los dos restantes, de tal forma que los tanques superiores evacuan agua a los inferiores por gravedad. Hay dos fuentes de alimentación de agua, cuyos caudales se pueden controlar con sendas válvulas. Cada fuente alimenta uno de los tanques inferiores y uno de los superiores, tal y como se muestra en la Figura 3. El modelo de la planta consta de cuatro estados, siendo cada uno de ellos el nivel de agua de cada uno de los cuatro tanques. La salida del sistema es la altura de ambos tanques inferiores. El objetivo de control es regular la altura de los dos tanques inferiores. La acción de control es la regulación de las válvulas que controlan el caudal de cada una de las fuentes de agua. Tanto la altura de los tanques como el valor de las acciones de control deben estar contenidas entre un valor superior e inferior, es decir, hay restricciones en caja tanto en el estado como en la acción de control.

Para este sistema $n = 4$, $m = 2$ y $p = 2$. Se toma un horizonte de predicción $N = 30$. Por lo tanto, el número de variables de decisión del problema QP (5) es 180.

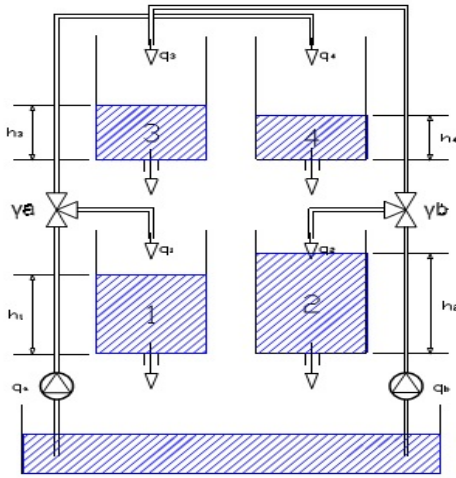


Figura 3: Planta de cuatro tanques de agua

Se han introducido las matrices del modelo del sistema y los parámetros del controlador en la librería de MATLAB, se ha importado en controlador generado en Unity Pro XL y se ha programado en un PLC Modicon m340.

Las figuras 4, 5 y 6 muestran la evolución de la salida del sistema, el estado del sistema y la acción de control, respectivamente. Todas ellas en valor absoluto. Como se puede observar en Figura 4, la salida del sistema converge a la referencia - en líneas discontinuas - a pesar de que se está regulando al planta a un punto distinto del de linealización. Por otro lado, en Figura 5 se puede observar cómo el estado real del sistema no converge al estado de referencia generado por el SS-TO, x_r . Sin embargo, el estado predicho x_p sí lo hace.

En las figuras se representan 10 periodos de muestreo en modo manual, tras los cuales se activa el modo automático del controlado.

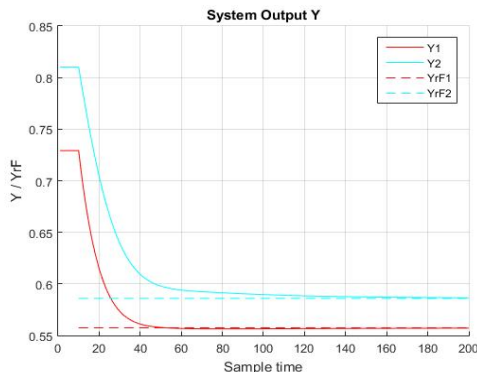


Figura 4: Salida del sistema y referencia en salida

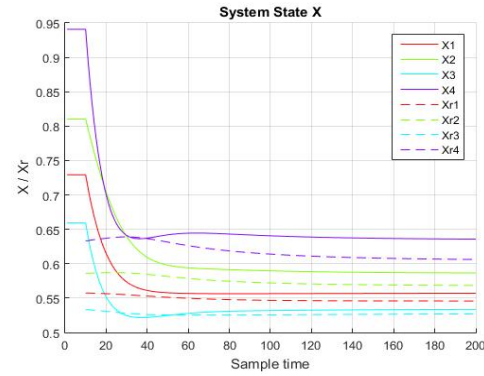


Figura 5: Estado real del sistema y referencia en estado

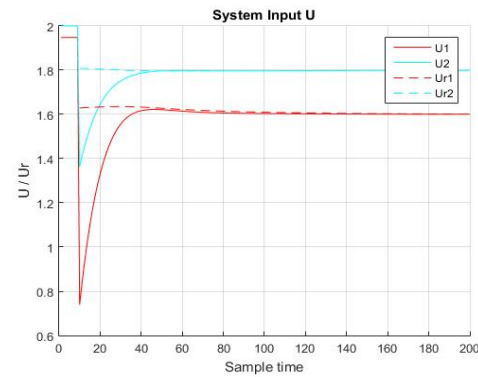


Figura 6: Acción de control aplicada y de referencia

7. Uso de memoria

Se han realizado dos conjuntos de pruebas para estudiar el uso de memoria de los controladores generados en función del tamaño del problema. En concreto, se han realizado dos conjuntos de pruebas, ambos sobre el PLC Modicom m340. En el primer conjunto (Figuras 7 y 8) se han mantenido constantes las matrices del modelo del sistema y se incrementado el valor del horizonte de predicción (N). Los valores de las dimensiones del modelo del sistema son $n = 4$, $m = 2$ y $p = 2$. En el segundo conjunto (Figuras 9 y 10) se han mantenido constantes los parámetros $N = 10$, $m = 2$ y $p = 2$, y se ha incrementado el valor de n .

Se ha medido tanto la memoria usada para almacenar los datos del problema como la memoria del código del programa. Los valores de memoria están expresados en kb.

Como se puede observar, la cantidad de memoria crece de forma lineal con el horizonte de predicción N y de forma cuadrática con el número de estados n . A pesar de que no se representa en este trabajo la evolución de la memoria en función de m o p , dejando el resto constantes, mencionar que

su comportamiento es lineal con m y cuadrático con p . Sin embargo, el parámetro que mayor efecto tiene sobre la memoria es n .

El conjunto de pruebas en las que se ha incrementado N se ha realizado usando el modelo de la planta de cuatro tanques de agua descrito en Sección 6.

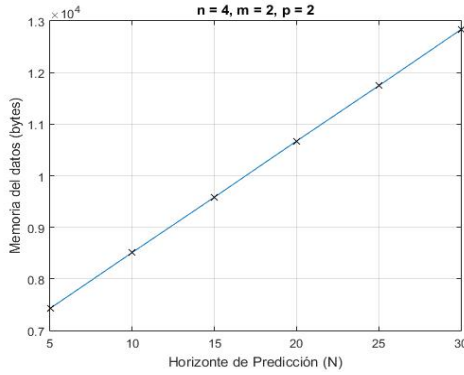


Figura 7: Memoria de datos en función de N

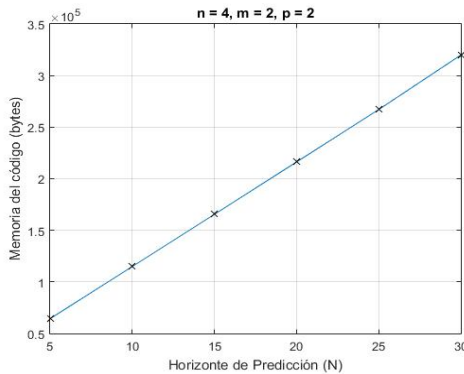


Figura 8: Memoria del código en función de N

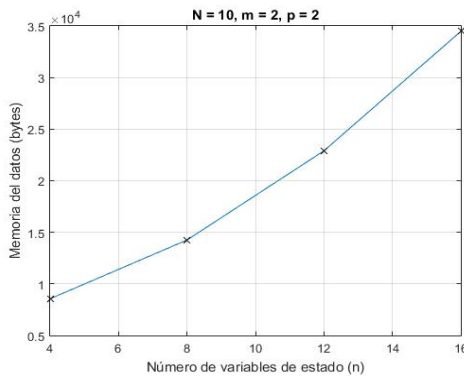


Figura 9: Memoria de datos en función de n

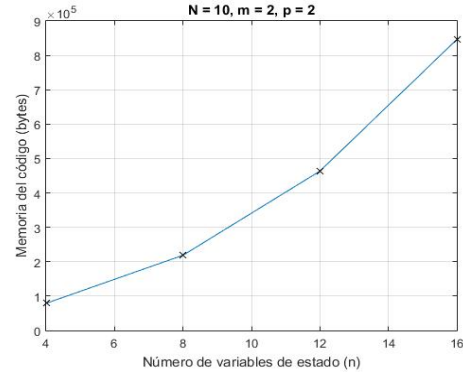


Figura 10: Memoria del código en función de n

8. Conclusiones

La librería propuesta genera el código un controlador predictivo orientado a la implementación en un PLC que aprovecha la estructura de una formulación concreta de MPC y un algoritmo concreto de resolución de problemas QP, FISTA. Esto permite obtener resultados de uso de memoria inferiores a los de otras soluciones ([10]), lo cual es de especial importancia considerando las grandes limitaciones de memoria de los PLC. El código generado está escrito en lenguaje estándar de los PLC, recogido en la norma IEC 61131-3, y puede ser directamente importado a su software de control.

Un objetivo del desarrollo de esta librería es la creación de una herramienta que facilite la implementación de controladores predictivos en autómatas programables. De ahí que se busque que sea fácil de instalar, usar y de introducir el controlador en el autómata. También se busca que el controlador posea todas las garantías y tenga en cuenta todas las consideraciones prácticas que se esperan de un controlador en el ámbito industrial.

Como posibles trabajos futuros se destacan la ampliación de estas garantías y consideraciones prácticas, así como la inclusión de características adicionales que resulten de interés. Como ejemplo se destacan las siguientes: formulación de control robusto, posibilidad de cambios de los parámetros del controlador y de las matrices del modelo del sistema en línea, o generación de código para otros equipos embebidos.

Agradecimientos

A los autores les gustaría agradecer al Mineco y los fondos FEDER por la financiación de los proyectos DPI2013-48243-C2-2-R y DPI2016-76493-C3-1-R que han dado lugar a este trabajo.

Referencias

- [1] A. Beck, M. Teboulle, “A Fast Iterative Shrinkage-Thresholding Algorithm for Linear Inverse Problems”, in *SIAM J. Imaging Sciences*, vol. 2, No.1, pp. 183-202, 2009.
- [2] B. J. T. Binder, D. K. M. Kufoalor, A. Pavlov, and T. A. Johansen, “Embedded Model Predictive Control for an Electric Submersible Pump on a Programmable Logic Controller”, in *2014 IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, 2014.
- [3] E. Camacho, C. Bordons, “Model Predictive Control”, Springer Science & Business Media, 2013.
- [4] A. Ferramosca, D. Limón, I. Alvarado, T. Alamo, E. Fernández, “MPC for Tracking With Optimal Closed-Loop Performance”, in *Automatica (Oxford)*, vol. 45, pp. 1975-1978, 2009.
- [5] R. Fletcher, “Practical methods of optimization”, 2nd ed. Chichester: New York, 1987.
- [6] B. Huyck, H. J. Ferreau, M. Diehl, J. D. Brabanter, J. F. M. V. Impe, B. D. Moor, and F. Logist, “Towards Online Model Predictive Control on a Programmable Logic Controller: Practical Considerations”, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2012, pp. 1-20, 2012.
- [7] D. K. M. Kufoalor, S. Richter, L. Imsland, T. A. Johansen, M. Morari, and G. O. Eikrem, “Embedded model predictive control on a PLC using a primal-dual first-order method for a subsea separation process”, in *Proc. 22nd IEEE Mediterranean Conf. Control and Automation (MED 2014)*, Palermo, Italy, 2014.
- [8] U. Maeder, F. Borrelli, M. Morari, “Linear offset-free Model Predictive Control”, in *Automatica*, vol. 45, pp. 2214-2222, 2009.
- [9] J. Mattingley and S. Boyd, “CVXGEN: A Code Generator for Embedded Convex Optimization”, *Optimization and Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 1-27, 2012.
- [10] M. Pereira, D. Limon, D. Muñoz de la Peña, T. Alamo, “MPC implementation in a PLC based on Nesterov’s fast gradient method”, in *23rd Mediterranean Conf. Control and Automation (MED)*, Torremolinos, Spain, 2015.
- [11] R. T. Rockafellar, “Convex analysis”, Princeton, NJ: Princeton University Press, 1970.
- [12] F. Ullmann, “A Matlab toolbox for C-code generation for first order methods”, Master’s thesis, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2011.
- [13] P. Zometa, M. Kögel, and R. Findeisen, “ μ AO-MPC: A Free Code Generation Tool for Embedded Real-Time Linear Model Predictive Control”, in *2013 American Control Conference (ACC)*, Washington, DC, USA, June 2013, pp. 5320-5325.

Diseño de un emulador de aerogenerador de velocidad variable DFIG y control de pitch

Manuel Lara Ortiz, Juan Garrido Jurado, Francisco Vázquez Serrano
Departamento de Informática y Análisis Numérico, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales,
Edificio Leonardo Da Vinci, Córdoba, España,
e-mail: p12laorm@uco.es, juan.garrido@uco.es, fvazquez@uco.es

Resumen

Entre las fuentes renovables existentes, la energía eólica está alcanzando importantes tasas de producción dentro del escenario energético mundial. Dado que el control de los generadores eólicos es una disciplina muy técnica, las metodologías de enseñanza práctica son de especial relevancia y disponer de equipos que emulen el comportamiento de los sistemas reales es todo un reto. En este trabajo, se implementa el emulador de una turbina eólica utilizando generador eléctrico de inducción con doble alimentación (DFIG) de pequeña potencia, cuyo eje de rotación es solidario con un servomotor brushless de corriente continua que actúa de motor de arrastre simulando el par aerodinámico. Este servo está controlado por ordenador, que permite reproducir mediante simulación toda la componente aerodinámica y mecánica de la que carece la planta experimental, incluyendo el comportamiento del viento. Este trabajo presenta por una parte, la descripción de una planta de laboratorio que permite emular el funcionamiento de un aerogenerador de velocidad variable, y por otra, una búsqueda de control óptimo sobre el par aerodinámico a través del ángulo de paso de pala dentro de la zona nominal.

Palabras Clave: control de par, velocidad variable, paso variable, aerogenerador experimental, DFIG.

1 INTRODUCCIÓN

La energía eólica se ha convertido en la tecnología de generación eléctrica renovable más prometedora. En la Unión Europea, desde 1990 se ha mantenido un crecimiento anual del 20% en la producción de energía eólica (Boukhezzar, 2007). En España, la energía procedente por parte del viento supone un 19,54% de la cobertura de la energía actual, situándose incluso por delante de energías tradicionales como el carbón [1].

Para que esta fuente alternativa de energía siga siendo viable, es necesario que los generadores

eólicos continúen mejorando y también sus sistemas de control. En general, estos sistemas tratan de conseguir una generación eficiente de electricidad, suponiendo condiciones ambientales cambiantes que consisten en variaciones importantes tanto en la magnitud como en la dirección del viento. Esto no es nada fácil, ya que son sistemas multivariables con fuertes no linealidades y considerables restricciones como se muestra en la bibliografía [2].

Disponer de un sistema que represente un aerogenerador sin depender físicamente de los recursos naturales del viento y de una turbina real, resulta esencial [3]. Por ello, es necesario desarrollar equipos de ensayo en los que testear diferentes estrategias de optimización y control, así como para formar a futuros ingenieros que puedan integrarse en empresas del sector. Especialmente adecuada puede ser la emulación de las características aerolásticas de estos procesos, pues resultan especialmente difíciles de reproducir en laboratorios convencionales.

En los últimos años, ha habido un avance importante en el desarrollo de emuladores eólicos [4], [5]. La mayoría de ellos reproducen bastante bien el comportamiento mecánico de los sistemas de ángulo de paso de pala. Los motores de corriente continua son la elección más habitual para proporcionar una salida de par variable, puesto que éste es proporcional a la corriente de armadura del motor y mediante convertidores de potencia esta corriente puede ser modificada.

La tecnología predominante en la industria eólica es el generador de inducción doblemente alimentado (DFIG). En este trabajo se presenta un emulador de planta eólica de velocidad variable basado en este tipo de generadores. En ellos, el estator funciona a la frecuencia de la red eléctrica y el rotor es alimentado por un convertidor electrónico de potencia a la frecuencia de la red multiplicada por el deslizamiento.

La planta experimental con la que se ha trabajado está dotada de una componente eléctrica que reproduce con gran fidelidad los principales aspectos de los aerogeneradores de gran potencia mediante el

uso del DFIG y su convertidor de potencia. Sin embargo, carece de toda la parte aerodinámica-mecánica de los aerogeneradores reales.

Para paliar esta carencia se ha desarrollado una capa software adicional implementada en Simulink, la cual permite emular el comportamiento mecánico del aerogenerador. Esta capa alberga todo el modelo matemático de la parte aerodinámica y del mecanismo de transmisión y permite reproducir la característica de extracción de energía mediante la representación del coeficiente de potencia. Esta capa además dota de versatilidad a la planta al poder parametrizar el modelo matemático con diferentes valores.

El objetivo de la planta es servir de banco de pruebas realista para estudio de diferentes metodologías de control y optimización sobre diferentes escenarios de aerogenerador.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera: Primero se comentan los principios básicos de un aerogenerador y los distintos puntos de operación en los que suelen trabajar. Después se describen de forma resumida los distintos componentes que integran la planta y la red de comunicación que se ha diseñado para trabajar con la planta. Finalmente se describe el modelo diseñado en Simulink tanto del aerogenerador como del controlador para el pitch y se muestran algunos ensayos y pruebas realizadas.

2 ESTRUCTURA GENERAL DE UN SISTEMA EÓLICO

Los componentes principales de un sistema de conversión de energía eólica son fundamentalmente el rotor, el sistema de transmisión y la unidad generadora de potencia.

El rotor comprende las palas, que es lugar donde se produce la conversión aerodinámica y el eje, que enlaza las hélices a la transmisión y a los servomotores de actuación sobre el ángulo de paso.

El sistema de transmisión transfiere la potencia mecánica capturada por el rotor hacia el generador eléctrico. Está compuesto por los ejes de alta y baja velocidad, la caja de cambios y los frenos. La caja de cambio incrementa la velocidad rotórica a valores más adecuados para el funcionamiento del generador.

El generador eléctrico es el elemento que convierte la potencia mecánica en potencia eléctrica. Sus terminales están conectados a la red de consumo, o como en el caso de sistemas de velocidad variable, a un convertidor de frecuencia intermedio.

La figura 1 muestra un esquema del sistema eólico, así como de la estructura del sistema de control que se puede encontrar en diversas fuentes bibliográficas como [6]. El movimiento de la hélice es consecuencia de la fuerza del viento, que genera un par T_a que hace girar el mecanismo de rotación con una velocidad angular ω_r . Esta velocidad angular es proporcional a la velocidad del viento v .

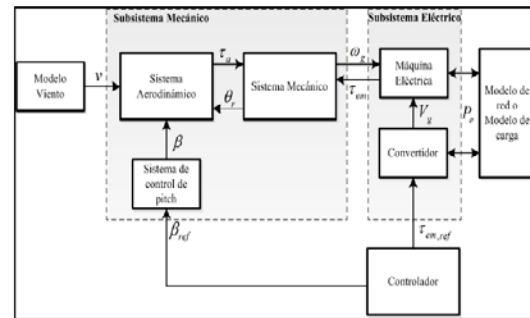


Figura 1: Estructura general de un sistema de conversión de energía eólica

Generalmente, para que la energía eléctrica se produzca de manera eficiente, es necesario que la velocidad rotórica sea aumentada antes de ser transmitida al eje del generador eléctrico. Por lo que es necesario un sistema de transmisión de engranajes, en cuya salida se obtiene la velocidad angular del eje de alta ω_g que es N veces mayor que la velocidad angular de eje de baja ω_r , lo que permite alcanzar magnitudes próximas al valor nominal requerido por el generador eléctrico.

La característica aerodinámica de la hélice puede ser modificada a través del sistema de control de posición, que hace girar cada pala un ángulo β sobre su propio eje. Este sistema permite adecuar la velocidad angular ω_r en función de las condiciones de viento.

El par en la salida del generador T_g es fruto de la velocidad angular en su eje. Este par es proporcional al par electromagnético del generador T_{em} dependiendo de la relación de transmisión entre engranajes N . T_{em} se controla a través de un convertidor de potencia.

2.1. REGIONES DE OPERACIÓN

El modo de funcionamiento de todo aerogenerador es dependiente de la intensidad de la velocidad del viento. Fundamentalmente se distinguen tres regiones de operación, como se muestra en la Figura 2.

En la región I (carga parcial) el aerogenerador opera a potencia mecánica subnominal y el objetivo es extraer toda la energía posible con objeto de mejorar la eficiencia.

En la región III (plena carga) el viento ha alcanzado una velocidad lo suficientemente alta para que la potencia producida se encuentre en niveles nominales. El objetivo en esta zona es mantener ese nivel de producción energética ante cualquier perturbación del viento para evitar posibles sobrecargas y fatigas estructurales. La región II es una región de transición entre ambas zonas.

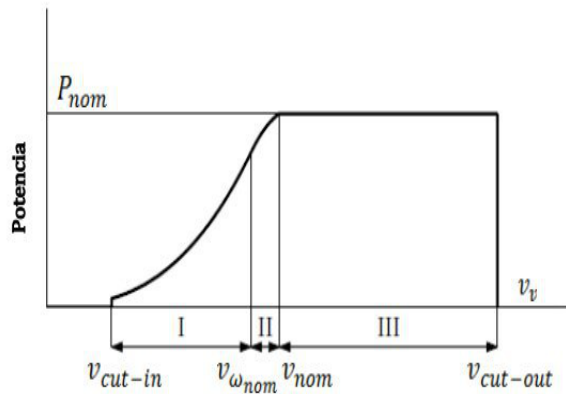


Figura 2: Regiones de operación en función de la velocidad del viento

3 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA EXPERIMENTAL

La planta experimental que se utiliza a lo largo de este trabajo es un pequeño generador eólica de la empresa italiana De Lorenzo. En concreto el modelo elegido es el DL WPP. En la Figura 3 se muestra una imagen del mismo.

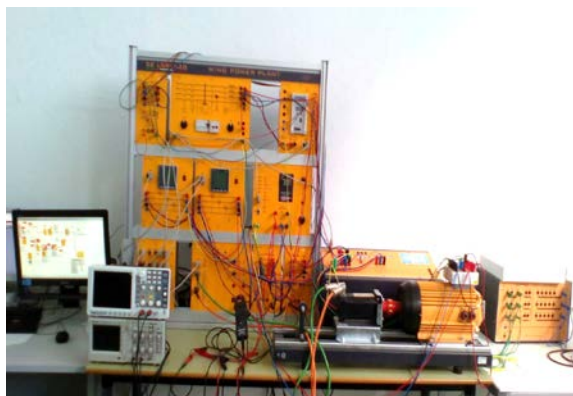


Figura 3: Planta eólica experimental

Esta planta permite estudiar diferentes situaciones de operación de un sistema aerogenerador con la actual topología de un DFIG y un convertidor de potencia back-to-back incluido entre el rotor de la máquina y la red eléctrica.

Concretamente, la planta consta de:

- Un servomotor brushless de corriente continua (potencia de 1 kW) con su correspondiente controlador, a través del cual se reproduce el par T_a obtenido de la parte mecánica-aerodinámica emulada.
- Un motor de inducción con devanados trifásicos tanto en el estator como en el rotor (DFIG) de un 1 kW de potencia nominal.
- Un rectificador AC-DC con entrada de línea trifásica y salida en un bus de corriente continua.
- Un inversor para motores trifásicos de inducción.

También consta de otros elementos que complementa a la planta, como son analizadores de red, interruptores, un módulo de alimentación trifásica, un relé combinado de sobrecorriente y falla de tierra y un transformador.

A la planta se le han añadido los sistemas necesarios para establecer la comunicación y control de los distintos dispositivos gracias a:

- Un hub para comunicación Modbus.
- Una pasarela de comunicación TCP/IP MODBUS

El flujo de información se transmite entre los diferentes elementos a través de un bus interno de comunicación bajo el protocolo Modbus RTU. Este bus de comunicación también se utiliza para la transmisión de los datos hacia un SCADA abierto sobre el que se pueden realizar modificaciones.

3.1. RED DE COMUNICACIÓN

La comunicación establecida consta de un ordenador (en el que se encuentra el SCADA), otro PC donde se desarrolla la capa de emulación programada con la planta experimental y los distintos módulos de la planta (motor brushless, analizadores de red, inverter, etc). Ambos ordenadores se comunican con los diversos módulos de la planta a través de una pasarela de comunicación Modbus RTU-TCP/IP. Por lo tanto se trata de una comunicación híbrida, en la que por un lado, los dos ordenadores actúan como maestros TCP/IP conectados a la pasarela se encargada de hacer de semáforo, y por el otro, los módulos de la planta desempeñan el papel de esclavos Modbus RTU.

En concreto los esclavos están distribuidos a través de dos tipos redes de comunicación independientes: RS-485 y RS-232. La Figura 4 muestra la solución establecida a través de una pasarela Modbus RTU-TCP/IP

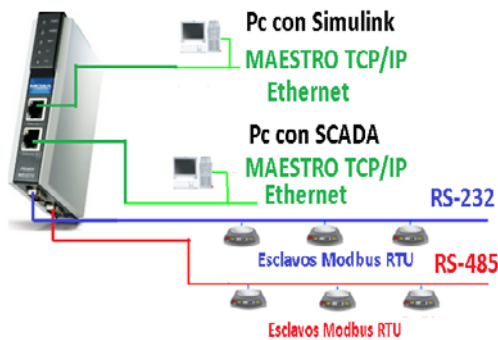


Figura 4: Comunicación establecida

Los datos procedentes de Modbus TCP/IP hacia el Pc y viceversa, se transmiten y reciben desde Simulink a través de funciones .m, donde se encapsulan las tramas basado en el entramado según protocolo Modbus.

4 EMULACIÓN DE LA COMPONENTE MECÁNICA Y AEROLÁSTICA

4.1. MODELO MATEMÁTICO

La potencia mecánica extraída del viento por parte de un aerogenerador se puede expresar como:

$$P_a = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

donde, ρ es la densidad el aire (kg/m^3), A es el área efectiva de la turbina (m^2), v es la velocidad del viento (m/s) y C_p es definido como el coeficiente de potencia que depende a su vez del coeficiente de velocidad específica (λ) y del ángulo de paso de pala o pitch (β). Éste representa la eficiencia de la turbina.

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v} \quad (2)$$

donde ω_r es la velocidad angular del rotor y R es el radio del rotor.

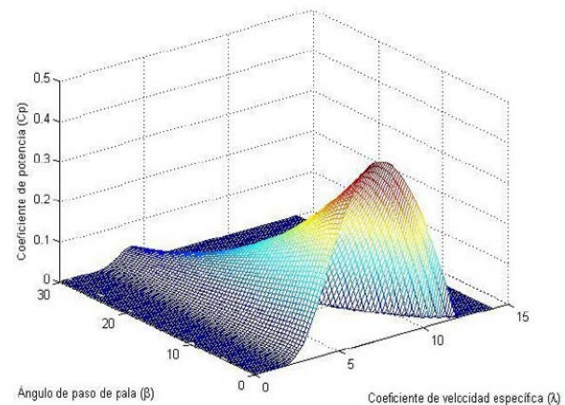
Como se muestra en [7], el coeficiente de potencia se puede aproximar a través de las expresiones analíticas (3) y (4).

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \beta^{C_5} - C_6 \right) e^{-\frac{C_7}{\lambda_i}} \quad (3)$$

$$\lambda_i = \left[\left(\frac{1}{\lambda + C_8 \beta} \right) - \left(\frac{C_9}{\beta^3 + 1} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

La Figura 5 representa el coeficiente de potencia con los coeficientes $C_1=0.73$, $C_2=151$, $C_3=0.58$,

$C_4=0.002$, $C_5=2.14$, $C_6=13.2$, $C_7=18.4$, $C_8=-0.02$, $C_9=-0.003$.

Figura 5: Curvas de superficie de los coeficientes de potencia C_p frente a λ y β

4.2. MODELO SIMULINK

Como se ha comentado anteriormente, se ha desarrollado una capa software adicional implementada en Simulink con la parte aerodinámica-mecánica necesaria. Esta capa incorpora las expresiones (1)-(4), que junto a las ecuaciones del sistema mecánico de un aerogenerador expresada por (5)-(9) permite simular y transferir la consigna de par aerodinámico sobre el motor de arrastre. La consigna de par depende de ciertos parámetros del aerogenerador emulados, como pueden: el radio del rotor, el ángulo de paso de pala, la velocidad del viento, etc.

$$J_t \frac{d\omega_r}{dt} = T_a - B_t \omega_r - T_{em} \quad (5)$$

$$J_t = J_r + N^2 J_g \quad (6)$$

$$B_t = B_r + N^2 B_g \quad (7)$$

$$T_g = N T_{em} \quad (8)$$

$$N = \frac{\omega_g}{\omega_r} \quad (9)$$

Se ha concebido esta capa software como algo versátil, que permita parametrizar un modelo con diferentes valores de un aerogenerador que sean coherentes con la potencia nominal del generador eléctrico.

En una búsqueda bibliográfica [8], [9] y a modo ilustrativo se han obtenido los parámetros de un aerogenerador de pequeña potencia de 1kW.

La Tabla 1 y Tabla 2 recogen los principales parámetros aerodinámicos y mecánicos, respectivamente. El coeficiente de potencia elegido es el mismo que el representado en la Figura 1.

Tabla 1: Parámetros aerodinámico de la turbina

Parámetros	Valor
Velocidad nominal del viento v	8.7 m/s
Rango de velocidad de la turbina ω_r	190-410 rpm
Radio de las palas R	1.45 m
Coefficiente de velocidad específica λ_{opt}	7.2
Máximo coeficiente de potencia C_{p_max}	0.44
Densidad del aire ρ	1.1225 kg/m ³

Tabla 2: Parámetros mecánicos del sistema

Parámetros	Valor
Inercia del eje de baja velocidad J_r	0.028 kg/m ²
Coefficiente de fricción viscosa en los cojinetes del rotor (eje de baja velocidad) B_r	0 N·m·seg/rad
Inercia del mecanismo en la parte de alta velocidad J_g	0.0001 kg/m ²
Coefficiente de fricción viscosa en los cojinetes del generador (eje de alta velocidad) B_g	0 N·m·seg/rad

El bloque diseñado en Simulink, dispone de tres entradas (velocidad del viento, par electromagnético y pitch), una salida (par aerodinámico). Además contiene una máscara para definir los parámetros que caracterizan el modelo del sistema aerodinámico

En el interior del bloque principal se encuentran tres estructuras. La primera de ellas realiza un filtrado de las señales de velocidad del viento y del ángulo de paso de pala, la segunda realiza el cálculo del coeficiente de potencia a través del coeficiente de velocidad específica y la tercera obtiene los valores del par aerodinámico y velocidad angular del generador.

A través de la comunicación establecida, con los bloques de Simulink TCP/IP Receive y TCP/IP Send se envía al motor brushless consignas de par que emulan el par aerodinámico provocado por el viento y se reciben valores como la velocidad angular a la que está girando el motor gracias a la lectura de un encoder que tiene integrado.

4.3. CONTROL DEL DFIG

Actualmente, gracias al sistema de comunicación implantado en el entorno Simulink, la planta permite el funcionamiento completo como un aerogenerador DFIG. En la Figura 6 y 7 se muestran los diferentes lazos de control implementados según la región de

funcionamiento, que depende de la velocidad del viento.

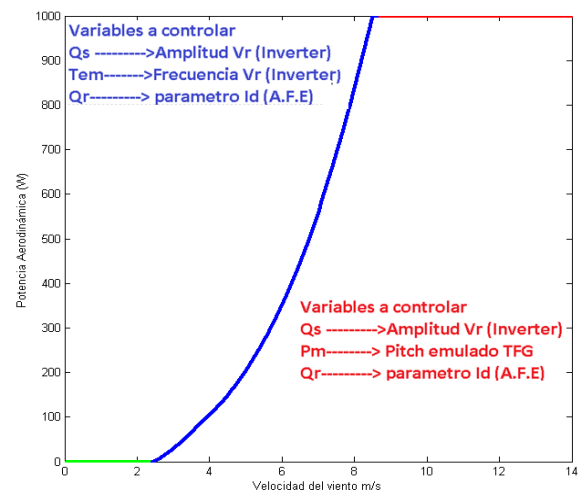


Figura 6: Lazos de control a implementar sobre la planta en función de la zona de operación

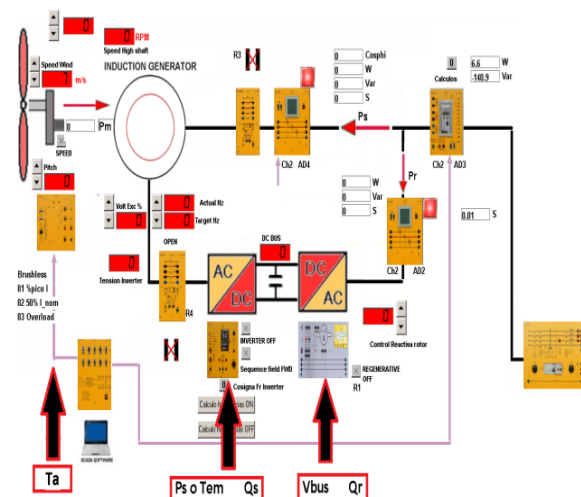


Figura 7: Esquema de control implantado en la planta WPP_DL

En la Figura 6 y 8 se muestran el diseño de los distintos puntos de trabajo de la planta, obtenidos a partir de una función en Matlab que permite obtener las distintas curvas características del modelo elegido. Concretamente se realiza un barrido de velocidad angular de la turbina y velocidad de viento para un pitch de 0 grados (C_{p_max}), obteniendo para cada velocidad de viento la potencia aerodinámica máxima y la velocidad angular de la turbina necesaria para ello.

Dentro de la región I, para obtener cada punto de máxima potencia es necesario un par T_{em} que la capa software debería imponer a través del controlador del lado del rotor (RSC, inverter) para extraer la máxima potencia.

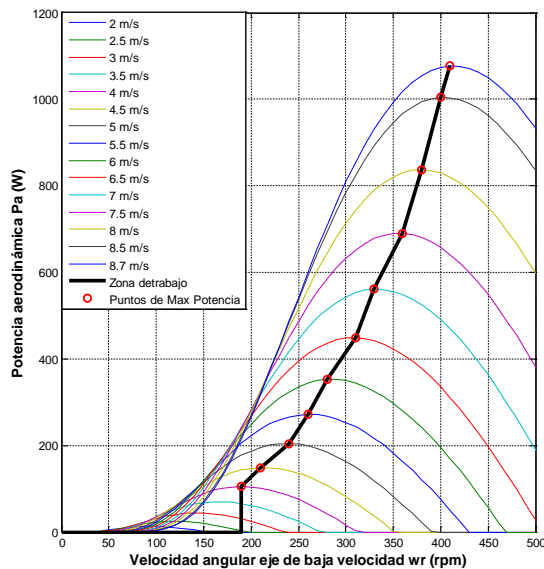


Figura 8: Curva potencia-velocidad de turbina

5 CONTROL DEL PAR AERODINÁMICO

5.1 ESTRATEGIA DE CONTROL

El modelo de planta diseñada puede operar en dos zonas de trabajo, que se distinguen en función de la velocidad del viento:

- Velocidades de viento inferiores a 8.7 m/s (zona de seguimiento de puntos de máxima potencia).
- Velocidades de viento superiores a 8.7 m/s (zona nominal).

Como podemos ver en la figura 8, para vientos superiores a 8.7 m/s el aerogenerador no debe generar más potencia siendo el valor del ángulo de paso de pala, en ese momento 0 grados, el cual comienza a ascender conforme aumenta la velocidad del viento. El valor de velocidad angular en el eje de baja velocidad es de 413 rpm, la de alta es de 3100 rpm (controlado por el par electromagnético T_{em}) y el par aerodinámico $T_a=25$ N·m. En estos valores debe permanecer el aerogenerador aunque la velocidad del viento experimente crecimiento. Mediante la variación del ángulo de paso de pala se mantiene el par aerodinámico T_a a su valor nominal. Este es el objetivo del control que se va a realizar.

5.2 ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DEL PAR AERODINÁMICO EN LA REGIÓN NOMINAL

Como primera prueba de control sobre la planta emuladora, se establece un control de par

aerodinámico en la región nominal manipulando el ángulo de paso de pala virtual.

Previo al diseño e implementación del controlador se establece un análisis e identificación de la dinámica del par aerodinámico frente a cambios en el ángulo de paso de pala y viento.

La identificación de la dinámica de la velocidad se lleva a cabo en la región 3. Esta región se alcanza para una velocidad de viento de 8.7 m/s y un pitch de 0°. Se han utilizado varios puntos de identificación para diferentes velocidades de viento comprendidas entre los 8.7 m/s y los 14 m/s. Para cada velocidad del viento, a su vez, se han establecido diferentes rangos de identificación de ángulo de paso de pala, desde 0° hasta 12°

Recurriendo a la función de linealización de Matlab, se han obtenido varios modelos de espacio de estado lineal en tiempo continuo alrededor del punto de operación que se ajustan a dinámicas de primer orden. Se observan pequeñas variaciones tanto en la ganancia como en la constante de tiempo del modelo para diferentes pitch y velocidades de viento.

Finalmente se decide elegir una dinámica intermedia (10) de entre las distintas obtenidas, en concreto la obtenida para con el punto de operación a una velocidad de 9.5 m/s y un valor de ángulo de pala de 3.6 grados.

$$T_a(s) = \frac{-7.632}{s + 4} \text{Pitch}(s) + \frac{2.0711}{s + 0.25} v(s) \quad (10)$$

5.3 IMPLEMENTACIÓN

Actualmente los tipos de control de pitch más utilizados en el ámbito de los aerogeneradores son el típico PI como en [10], [11]. Por dicho motivo, para la elección del controlador de par aerodinámico a través del pitch se decide utilizar estos controladores. Cuando se realiza la optimización de sistemas de control se pueden considerar diferentes índices de control óptimo como ISE (Integral Square Error), IAE (Integral Absolute Error), ITAE (Integral of Time Absolute Error), ITSE (Integral of Time Weighted Squared Error). En este caso se usará el índice IAE.

Con la aspiración de encontrar los valores de los parámetros del PI que proporcionen el IAE más bajo posible frente a perturbación del viento, se ha utilizado en un primer momento la herramienta PID Tuner de Matlab, la cual permite obtener un diseño de forma sencilla fijando la robustez (margen de fase) y modificando la frecuencia de cruce de ganancia o viceversa. Al ser esto último una tarea tediosa de parametrizar manualmente, se decide además utilizar la toolbox de Matlab llamada

Optimtool, con la cual mediante algoritmos genéticos se ajustan los mejores parámetros del PI que proporcionen el IAE más bajo. El controlador PI se ha implementado en Simulink mediante un bloque Embedded Matlab Function. Se ha usado una estructura convencional PI no interactiva con anti-windup.

El uso de control feedforward o control anticipativo ya se viene utilizando de diversas formas en el control de los aerogeneradores DFIG, como podemos observar en trabajos como [12], [13]. El control feedforward se puede combinar con un control PID de forma que se sumen las ventajas de cada uno. La unión de los dos controles puede mejorar significativamente el desempeño del sistema en aquellos casos en los que una perturbación puede ser medida antes de que afecte a la salida del proceso. Gracias a esto, el controlador PID encontrará un error menor que corregir.

6 SINTONÍA FINAL Y RESULTADOS

Se implementan los controladores PI y PI con feedforward en Simulink, buscando la mejor parametrización posible de los parámetros K_p , T_i que obtengan un índice IAE lo más bajo posible, gracias a la utilización de la herramienta PID Tuner de Matlab y de los algoritmos genéticos de la toolbox de Matlab Optimtool.

Como primer método de sintonía del PI se realizan diversos diseños a partir del modelo obtenido (10) con la herramienta PID Tuner, que después son implementados en el modelo no lineal ante un viento creado con una función.m que consta de un valor inicial promedio de 9.5 m/s y una componente sinusoidal de 0.5 m/s durante 900 segundos. Se obtienen los parámetros variando el margen de fase entre 80, 82, 84, 86, 88 y 90 grados y dejando constante la frecuencia de cruce de ganancia en 13.3 rad/s, la cual corresponde a un tiempo de respuesta de 0.15 segundos (tiempo de muestreo).

Como segundo método de sintonía del PI se realizan múltiples búsquedas con el modelo no lineal utilizando algoritmos genéticos, buscando los parámetros que obtienen un IAE más bajo ante un viento con las condiciones de la parametrización anterior. Estos resultados son mejores que los obtenidos manualmente con la herramienta PID Tuner.

Se escogen los controladores que obtienen un IAE más bajo y se prueban ante un viento aleatorio fuera del punto de operación en el que fueron diseñados (Figura 9). En concreto se trata de un viento con un valor inicial promedio de 9.5 m/s, una componente

sinusoidal de 0.5 m/s, una componente turbulenta con desviación típica de 1 m/s, una componente rampa de +3 m/s (400-500 s) y una componente ráfaga de -2 m/s (700-800 s).

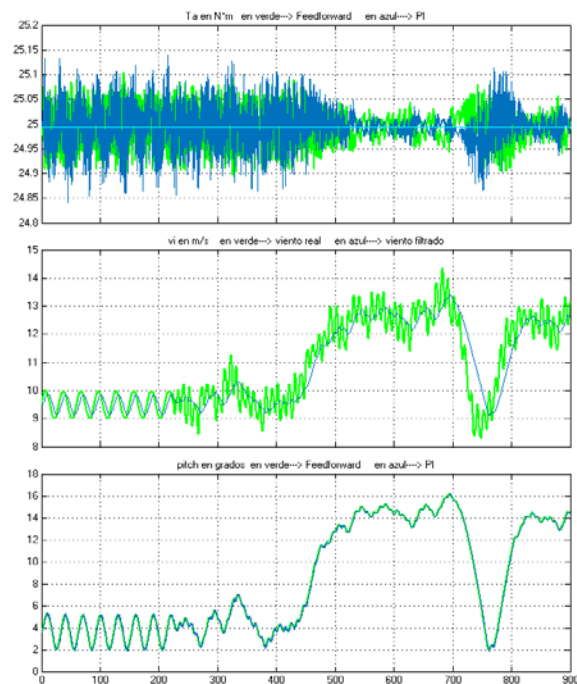


Figura 9: Señales 'y', 'perturbación' y 'u' para PI con y sin feedforward ante viento aleatorio fuera del punto operación

Tabla 1: Parámetros de los controladores

Controlador PI			
	K_p	T_i	IAE
Con feedforward	-0.896	0.231	16.54
Sin feedforward	-1.189	0.124	23.28

Como se observa en la tabla 1, se ha obtenido un IAE de 16.54 con margen de fase de 88 grados, margen de ganancia infinito y frecuencia de cruce de ganancia de 6.98 rad/s para el controlador PI con feedforward y un IAE de 23.28 con margen de fase de 73.5 grados, margen de ganancia infinito y frecuencia de cruce de ganancia de 10.7 rad/s para el controlador PI sin feedforward.

Como podemos observar, ambos controladores consiguen mantener el valor de la señal 'y' (T_a) muy próximos al valor de referencia deseado y existe muy poca diferencia respecto a la señal de control 'u' (pitch). Se puede apreciar como el control PI sin feedforward presenta algunos picos más abruptos a la hora de controlar la señal 'y'. Además se puede percibir como el controlador PI con feedforward detecta la variable perturbadora y toma la acción

correctiva antes de que la variable controlada se desvíe de su punto de referencia.

7 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se ha construido un banco de pruebas que permite emular el funcionamiento de un aerogenerador VS-VP experimental de tecnología similar a los equipos de mediana y gran potencia, y sobre el cual es posible aplicar diferentes estrategias de control y extrapolar los resultados hacia otros equipos de mayor potencia.

Se ha implementado un controlador para la región de funcionamiento nominal, en la que se controla el par aerodinámico al valor nominal del DFIG a través del ángulo de paso de pala. Tras sintonizar los parámetros de los controladores (PI, PI con feedforward) individualmente a través de algoritmos genéticos con la toolbox de Matlab Optintool, queda de manifiesto que para el aerogenerador diseñado, el mejor controlador que obtiene un IAE más bajo es el PI con feedforward optimizando en un 29% dicho índice.

Como trabajo futuro se plantea el estudio de técnicas de minimización de interacción entre variables de control a través de redes de desacoplo. Así mismo se plantea trabajar con software de diseño aerolástico, en concreto FAST, habitualmente utilizado por las compañías de ingeniería eólica, como IBERDROLA o GAMESA, con el objetivo de unir este software de simulación a la planta eléctrica, de forma que se realice el mismo tipo de estrategias: simulación de la parte aerolástica y experimentación real con equipo eléctrico.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de Excelencia P10-TEP-6056 Junta de Andalucía.

Se agradece a la Universidad de Córdoba por la beca concedida a Manuel Lara para el desarrollo de este trabajo "II Becas Semillero de Investigación".

Referencias

- [1] AEE (2015), Eólica'15, Asociación Empresarial Eólica
- [2] Nagai Baku M, Ameku Kazumasa, Roy Jitendro Nath. Performance of a 3 kW wind turbine generator with variable pitch control system. *Appl Energy* 2009:1774–82
- [3] J. Vaheeshan, V. Vihirathanath, S.G. Abeyaratne, A. Atputharajah, G. Ramatharan (2011) Wind Turbine Emulator, 6th International Conference on Industrial and Information Systems, Sri Lanka.
- [4] R. Pena, J. C. Clare, and G. M. Asher, "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable speed wind-energy generation," *Proc. Inst. Elect. Eng.—Elect. Power Appl.*, vol. 143, no. 3, pp. 231–241, May 1996.
- [5] A. Sajadi, à. Rosáaniec, M. Káos, P. Biczal, and K. A. Loparo, "An emulator for fixed pitch wind turbine studies," *Renewable Energy*, vol. 87, pp. 391–402, 2016
- [6] Gonzalo Abad, Jesús López, Miguel A. Rodríguez, Luis Marroyo, Grzegorz Iwanski. "DOUBLY FED INDUCTION MACHINE". JOHN WILEY & SONS. 2011
- [7] F. Vázquez, M. González, J. Garrido, and F. Morilla, "Control Multivariable: aplicación al control de un aerogenerador," presentado en el X Simposio CEA de Ingeniería de Control. 2012.
- [8] AEOLOS WIND TURBINE
<http://www.windturbinestar.com/Aerogenerador-1kw.html> (Último acceso el 01/06/2017).
- [9] ENAIR
<https://www.enair.es/es/aerogeneradores/E30PRO> (Último acceso el 01/06/2017).
- [10] M. Q. Duong, F. Grimaccia, S. Leva, M. Mussetta, and E. Ogliari, "Pitch angle control using hybrid controller for all operating regions of SCIG wind turbine system," *Renewable Energy*, vol. 70, pp. 197–203, 2014.
- [11] J. Zhang, M. Cheng, Z. Chen, and X. Fu, "Pitch angle control for variable speed wind turbines," in *Deregulation, Restructuring, and Power Technologies*, Nanjing China, 2008, pp. 2691–2696.
- [12] K. Selvam, S. Kanev, J. v. Wingerden, J. Engelen, and M. Verhaegen, "Feedback-feedforward individual pitch control for wind turbine load reduction," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 19, pp. 72–91. 2009.
- [13] Chengyuan Yu, Dongdong Li "Fuzzy-PI and feedforward control strategy of DFIG wind turbine," 2012 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia, ISGT Asia 2012, art. no. 6303299.

Observación de la fracción de agua líquida en pilas de combustible tipo PEM de cátodo abierto

Julio Luna (julio.luna@chalmers.se)

Chalmers University of Technology, Hörsalsvägen 11, SE-41296 Göteborg, Sweden

Ramon Costa Castelló (ramon.costa@upc.edu)

Institut de Robòtica i Informàtica Industrial, CSIC-UPC. Llorens i Artigas 4-6, 08028 Barcelona, Spain

Resumen

En este trabajo se diseña un observador no-lineal basado en modos deslizantes para la estimación de la fracción de agua líquida en una pila de combustible tipo PEM de cátodo abierto. La pila de combustible se modela con dos estados dinámicos: la temperatura del stack y la saturación de agua líquida. La estrategia de observación se valida en simulación mediante un ciclo de conducción ARTEMIS.

Palabras clave: pila de combustible, observación, modos deslizantes, modelado.

1. INTRODUCCIÓN

A medida que el consumo energético incrementa, la sociedad, la industria y los gobiernos están tomando conciencia de la necesidad de implantar nuevos sistemas de energía sostenibles que puedan reducir los problemas asociados con el uso de los combustibles fósiles. La utilización de dichas fuentes no renovables genera emisiones de carbono y no es sostenible a largo plazo. Lograr este cambio tecnológico y social requiere de importantes inversiones y esfuerzos de investigación enfocados a desarrollar alternativas limpias y sostenibles.

Estudios científicos [5] han concluido que los sistemas de generación de energía basados en hidrógeno son una prometedora solución a la hora de satisfacer las demandas de energía presentes y futuras, sin emisiones de carbono adicionales. El hidrógeno como vector energético posee considerables ventajas comparado con otras soluciones renovables. Además, la utilización de hidrógeno puede ayudar a reducir las emisiones de carbono a la atmósfera y diversificar el mercado de generación energética [12]. Esto es debido principalmente a que el hidrógeno puede ser producido a partir de fuentes primarias de energía renovable (solar y eólica). Adicionalmente, el hidrógeno puede quemarse directamente en turbinas para generar electricidad, obteniendo únicamente agua y calor como subproductos de la combustión o también puede utilizarse para alimentar pilas de combustible

y producir energía a partir de reacciones electroquímicas. El hidrógeno también puede ser almacenado a largo plazo, convirtiéndolo en un combustible ideal para transporte de larga distancia y aplicaciones móviles.

Las pilas de membrana de intercambio protónico (PEM), las cuales utilizan hidrógeno como combustible, poseen altas densidades de potencia y operan a temperaturas relativamente bajas. Las pilas de tipo PEM son una de las tecnologías de hidrógeno más prometedoras para aplicaciones automotrices, estacionarias y de ciclo combinado. Investigadores de todo el mundo están dedicando importantes esfuerzos para incrementar la eficiencia, reducir la degradación y disminuir los costes de producción de las pilas de combustible de tipo PEM. Para lograr los objetivos anteriores, las pilas de combustible requieren soluciones de control que tengan en cuenta las complejas dinámicas internas del sistema, las cuales incluyen fenómenos multi-físicos tales como mecánica de fluidos, termodinámica y cinética química.

La eficiencia y la degradación de las pilas de combustible están directamente relacionadas con las condiciones de operación internas. En el campo del control automático, nuevas técnicas de observación [8], diagnosis [11] y control [1] están siendo desarrolladas para mejorar las condiciones de operación de los sistemas basados en pilas PEM. La temperatura del sistema, concentraciones de especies gaseosas, densidad de corriente y contenido de agua son, entre otras, variables que afectan el rendimiento del sistema. Por otra parte, la vida útil de las pilas de combustible se ve drásticamente reducida cuando el sistema se ve sujeto a variaciones de carga inesperadas que pueden provocar situaciones de desabastecimiento de reactantes en las capas catalizadoras.

El modelado juega un importante rol en las áreas de control y monitoreo del estado de salud de las pilas de combustible de tipo PEM. De hecho, a la hora de desarrollar estrategias de control y observación cuyo objetivo sea la mejora de la eficiencia y la durabilidad de los sistemas basados en pilas de combustible, los modelos dinámicos son necesarios. Por otra parte, mediante la utilización de

modelos matemáticos, es posible reducir los costes asociados con las pruebas de laboratorio.

Cuantificar la degradación en pilas de combustible es complejo. Una de las propuestas de la literatura [18] es el modelado del área efectiva de la reacción electro-química. Esta área efectiva viene determinada por el número de partículas de platino (Pt) activas en el soporte de carbono de la capa catalizadora del cátodo. El número de partículas de Pt activas depende entre otros de las especificaciones de fabricación del catalizador y del estado de hidratación del cátodo. La única variable disponible para diseñar estrategias de control activas es el estado de hidratación del cátodo, que puede ser obtenido a partir del valor de la fracción de agua líquida [14].

La estimación de los estados internos en pilas de combustible de tipo PEM está directamente relacionada con la implementación de estrategias avanzadas de control para mejorar la eficiencia y durabilidad [7]. Mientras que ciertas medidas son realizables mediante sensores, existen partes del sistema que no son accesibles debido a la estructura de la pila, como por ejemplo la fracción de agua líquida. El uso de modelos no-lineales combinados con estrategias de estimación de estado basadas en modelos es una solución novel a la hora de obtener información del estado interno de la pila de combustible [8]. Adicionalmente, el uso de herramientas matemáticas de observación de estados facilita la reducción del número de sensores y por lo tanto, la reducción su coste asociado [4].

La principal contribución del presente trabajo se basa en el desarrollo de un observador no-lineal basado en modos deslizantes para la estimación de la fracción de agua líquida presente en la pila de combustible de tipo PEM. Para lograr este objetivo, un modelo dinámico de una pila de combustible tipo PEM de cátodo abierto [14] se utiliza para el diseño del observador.

Éste artículo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 se presentan la descripción del sistema. El modelo de simulación se describe en la Sección 3. La estructura del observador de estados no-lineal se describe en la Sección 4. En la Sección 5 se presenta un caso de simulación y se analizan los resultados obtenidos. Finalmente, la Sección 6 resume las conclusiones de este artículo y se proponen las líneas futuras para continuar con la investigación.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En este estudio se analizará la pila de combustible (*stack*) comercial H100 desarrollada por *Ho-*

rizon Fuel Cells Technologies, esta está compuesta por 24 celdas y presenta una potencia nominal de 100 W. Esta pila, mostrada en la Figura 1, es de cátodo abierto y presenta una área activa de $22,5 \text{ cm}^2$, es auto-humidifica y refrigerada por aire. Incluye un único ventilador de refrigeración directamente unido a la carcasa de la pila de combustible, que refrigera la pila por convección forzada y, al mismo tiempo proporciona oxígeno al cátodo. Por lo tanto, el suministro de aire del cátodo y la pila de refrigeración no se pueden desacoplar.



Figura 1: Vista de la H100 [3]

La Figura 2 muestra un esquema del sistema de pila de combustible instalado en una estación de prueba de laboratorio. El ventilador es alimentado mediante fuente de alimentación de 12 V externa. Un controlador fija la velocidad de giro del ventilador. La velocidad del aire de entrada de cátodo se mediante un sensor de flujo de aire de alta precisión *E75 de E + E Elektronik*. La entrada del ánodo se alimenta con hidrógeno seco. Un regulador de presión manual mantiene la presión de entrada de ánodo a aproximadamente 0,4 bar. Los parámetros y principales constantes físicas del sistema se incluyen en la Tabla 1.

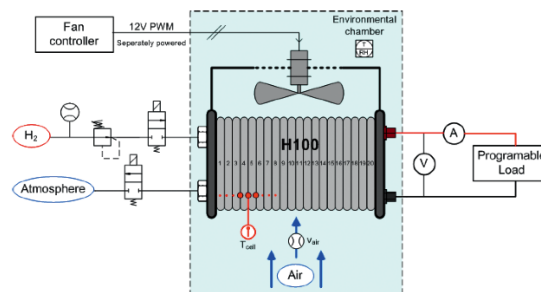


Figura 2: Esquema del sistema para una pila de combustible tipo H100

3. MODELO DEL SISTEMA

El modelo para el sistema descrito en la Sección 2 está descrito por:

$$\dot{x}_1 = K_1 z_1 y + K_1 z_1^2 + K_2 (z_2 - x_1) u, \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = K_3 z_1 - K_4 f_p(x_1) x_2 - f_d(x_2), \quad (2)$$

$$y = K_5 x_1 f_a(x_1, x_2, z_1). \quad (3)$$

Como se puede observar se trata de un modelo de segundo orden. Los estados corresponden a la temperatura de la pila de combustible ($x_1 = T_{fc}$) y la saturación de agua líquida ($x_2 = s$). La saturación corresponde a la relación del volumen de líquido respecto al volumen total de espacio vacío en la estructura porosa. Por lo tanto la saturación describe el contenido de agua líquida en la capa catalizadora [10]. El sistema presenta 3 entradas, la corriente de carga ($z_1 = I_{stack}$), la temperatura ambiental ($z_2 = T_{amb}$) y la velocidad de aire ($u = v_{air}$) del ventilador. Esta última suele usarse como acción de control. La salida del sistema, $y = V_{stack}$, corresponde a la tensión del *stack*. Así la potencia entregada por el sistema corresponde a $P = y \cdot z_1$.

Las Ecuaciones (1)-(2)-(3) presentan forma afín, y son altamente no lineales pues f_p , f_d y f_a lo son. Además la acción de control está multiplicada por funciones que dependen de los estados. El apéndice A contiene el detalle de todas ecuaciones y el valor de todos parámetros.

En trabajos previos [16, 17, 15] se han analizado en detalle las características dinámicas y estacionarias de este modelo.

4. OBSERVADOR

Siguiendo la estructura de observador no lineal propuesta por [2], el observador para el sistema descrito por la Ecuaciones (1)-(2)-(3) se expresa como:

$$\dot{\hat{x}}_1 = K_1 I - K'_1 I V_{stack} + \nu + g_1(\hat{\mathbf{x}}) u_1, \quad (4a)$$

$$\dot{\hat{x}}_2 = K_3 I - K_4 f_p(\hat{x}_1) \hat{x}_2 - f_d(\hat{x}_2) + g_2(\hat{\mathbf{x}}) u_2, \quad (4b)$$

$$\hat{y} = h(\hat{\mathbf{x}}) = \hat{x}_1, \quad (4c)$$

donde $\hat{\mathbf{x}} \triangleq [\hat{x}_1, \hat{x}_2]$, $\hat{x}_1 \triangleq \hat{T}_{fc}$ y $\hat{x}_2 \triangleq \hat{s}$. La variable observada de salida es la temperatura de la pila de combustible, descrita por la Ecuación (4c). Donde las funciones $g_1(\hat{\mathbf{x}})$ y $g_2(\hat{\mathbf{x}})$ y las señales u_1 y u_2 son elementos incorporados en el observador para forzar la convergencia de los estados des serán diseñadas para reducir el error de estimación a cero en tiempo finito.

4.1. Análisis de observabilidad

En sistemas no lineales, el estudio de la observabilidad depende del rango de la matriz de observabi-

lidad \mathcal{O} [2]. Para un sistema de orden n , la matriz de observabilidad se define como:

$$\mathcal{O}(\mathbf{x}) = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \begin{bmatrix} h(\mathbf{x}) \\ L_{f(\mathbf{x})} h(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ L_{f(\mathbf{x})}^{n-1} h(\mathbf{x}) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

donde n es el número de estados en \mathbf{x} y $L_{f(\mathbf{x})} h(\mathbf{x})$ es la derivada de Lie del vector de salida h a lo largo del campo vectorial $f(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^n$, definida como [13]:

$$L_{f(\mathbf{x})} h(\mathbf{x}) = \frac{\partial h(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} f(\mathbf{x}). \quad (6)$$

Y la k -ésima derivada de Lie:

$$L_{f(\mathbf{x})}^k h(\mathbf{x}) = \frac{\partial \left(L_{f(\mathbf{x})}^{k-1} h(\mathbf{x}) \right)}{\partial \mathbf{x}} f(\mathbf{x}). \quad (7)$$

Utilizando las Ecuaciones (6) y (7), la matriz de observabilidad para la Ecuación (4) es calculada:

$$\mathcal{O}(\hat{\mathbf{x}}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \xi(\hat{\mathbf{x}}) & \gamma(\hat{\mathbf{x}}) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

siendo ξ y γ funciones no lineales que dependen de los estados del sistema.

Tal y como demuestra [2], para garantizar la observabilidad de la Ecuación (4), el rango de \mathcal{O} debe ser igual a n , siendo $n = 2$ para el sistema estudiado en este trabajo. El rango de la Ecuación (8) sólo depende de γ , que se expresa como:

$$\gamma(\hat{\mathbf{x}}) = -\frac{IK'_1 K_5 \hat{x}_1}{3s^{opt} \left(1 - \frac{s^{opt} - \hat{x}_2}{s^{opt}} \right)}. \quad (9)$$

La condición que garantiza que $rank(\mathcal{O}) = 2$ es

$$\gamma(\hat{\mathbf{x}}) \neq 0. \quad (10)$$

Como K'_1 y K_5 son parámetros constantes y distintos que cero (consultar el Apéndice A), la condición (10) se cumple si x_1 , x_2 y I_{stack} son distintos que cero.

Una vez garantizada la observabilidad, las funciones g_1 y g_2 en la Ecuación (4) se obtienen del siguiente modo [2]:

$$\mathbf{g}(\hat{\mathbf{x}}) = \begin{bmatrix} g_1(\hat{\mathbf{x}}) \\ g_2(\hat{\mathbf{x}}) \end{bmatrix} = \mathcal{O}(\hat{\mathbf{x}})^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}^T, \quad (11)$$

lo cual resulta en

$$g_1(\hat{\mathbf{x}}) = 0, \quad (12)$$

$$g_2(\hat{\mathbf{x}}) = \frac{3I\hat{x}_2}{K'_1 K_5 \hat{x}_1}. \quad (13)$$

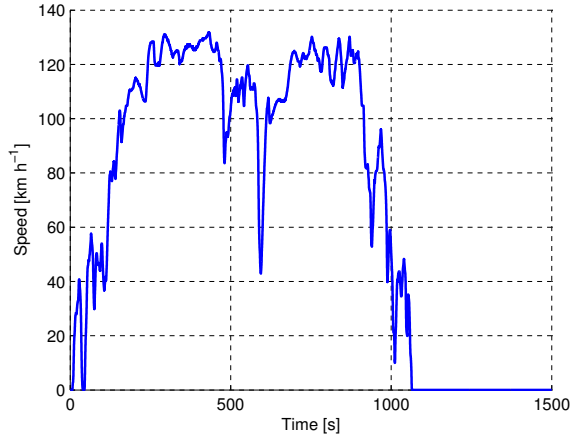


Figura 3: Ciclo de conducción ARTEMIS

Esta selección garantiza que el grado relativo de la salida medida, T_{fc} , y la acción de control del observador, u_2 , presentan un grado relativo igual al orden de la planta. Ello implica que no existirá dinámica cero y se podrá influir sobre todas las variables de estado del sistema.

Por lo tanto, considerando (12)-(13), la Ecuación (4) puede ser expresada del siguiente modo:

$$\dot{\hat{x}}_1 = K_1 I - K'_1 IV_{stack} + \nu \quad (14a)$$

$$\dot{\hat{x}}_2 = K_3 I - K_4 f_p(\hat{x}_1) \hat{x}_2 - f_d(\hat{x}_2) + \frac{3I\hat{x}_2}{K'_1 K_5 \hat{x}_1} u_2 \quad (14b)$$

$$\hat{y} = \hat{x}_1. \quad (14c)$$

4.2. Diseño de la acción de corrección

Como el único estado medido es T_{fc} , el error de observación e_y se expresa como la diferencia entre la salida estimada \hat{y} y el vector de salida medido y :

$$e_y = \hat{y} - y = \hat{x}_1 - x_1. \quad (15)$$

Para llevar la Ecuación (15) a cero en tiempo finito, se implementa una entrada de corrección u_2 , basada en modos deslizantes casi-continuos de segundo orden [6]:

$$u_2 = -\beta \frac{\dot{e}_y + |e_y|^2 \text{sign}(e_y)}{|\dot{e}_y| + |e_y|^{1/2}}, \quad (16)$$

donde β es la ganancia del observador ($\beta = 0,5e^{-3}$ para los resultados mostrados en la Sección 5).

La implementación de esta ley de corrección requiere la estimación de la derivada de e_y . En la actualidad se han propuestos varios algoritmos de derivación robustos que pueden ser fácilmente utilizados con este propósito.

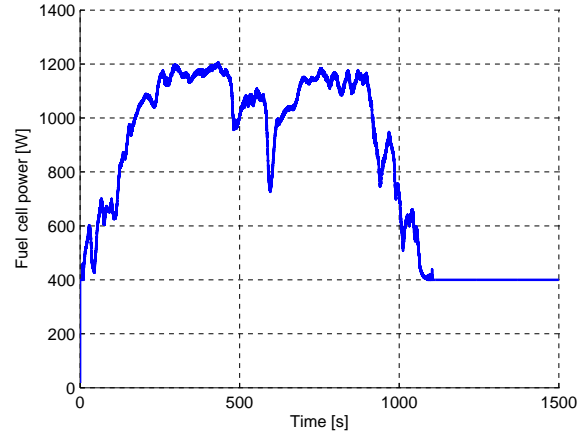


Figura 4: Perfil de potencia necesario para el seguimiento del perfil ARTEMIS (Figura 3)

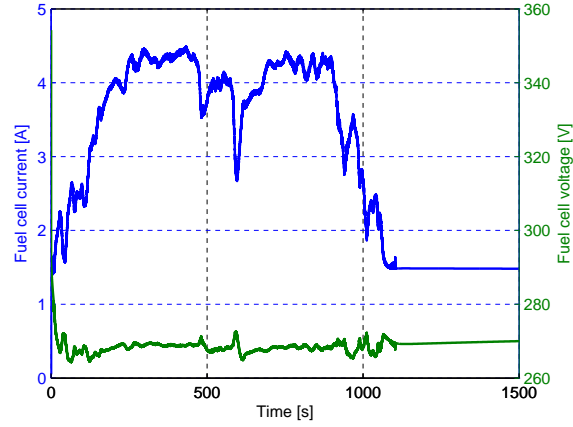


Figura 5: Perfil de tensión y corriente de la pila de combustible seguimiento del perfil ARTEMIS (Figura 3)

5. RESULTADOS

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos al utilizar la pila descrita en la sección 2 pero adaptada a una aplicación de tracción [9]. En la simulación se ha substituido las 24 celdas de la H-100 disponible en el laboratorio por 370 celdas. Este es el mismo número de celdas que utiliza la pila de combustible utilizada en el Toyota Mirai.

En esta sección se analizará el comportamiento del observador cuando el vehículo sigue un perfil de velocidad ARTEMIS (Figura 3). La Figura 4 muestra el perfil de potencia necesario para que el vehículo siga el perfil indicado. Se asume la existencia de un controlador de bajo nivel de la pila, no descrito en este trabajo, que fuerza que la pila sea capaz de aportar la potencia deseada para el seguimiento del perfil de velocidad. La Figura 5 muestra la corriente y la tensión de la pila durante el seguimiento del perfil. La corriente corresponde

a una entrada del modelo mientras que la salida corresponde a una de las salidas.

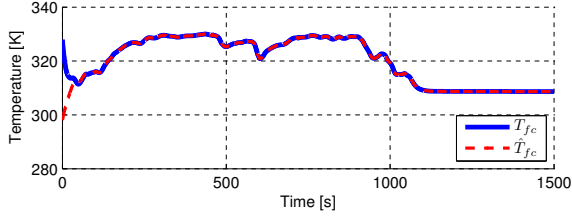


Figura 6: Evolución de la temperatura de la pila de combustible y la estimación del observador durante el seguimiento del perfil ARTEMIS (Figura 3)

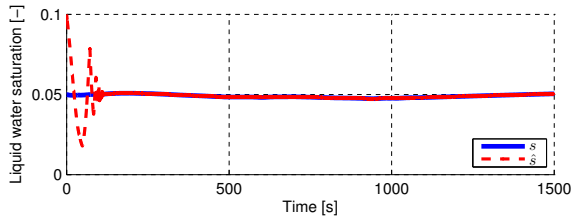


Figura 7: Evolución de la saturación de agua de la pila de combustible y la estimación del observador durante el seguimiento del perfil ARTEMIS (Figura 3)

La Figura 6 muestra la evolución de la temperatura de la pila, T_{fc} y su estimación \hat{T}_{fc} . Similarmente, la Figura 7 muestra la evolución de la fracción de agua líquida, s , y de su estimación, \hat{s} . Como se puede observar, después de un pequeño transitorio la estimación converge a la variable de estado, y una vez se ha producido la convergencia ambas variables permanecen juntas. La Figura 8 muestra la acción de control, u_2 , utilizada para forzar la convergencia de la estimación del estado, \hat{x} , al estado x del modelo. Como se puede observar, después de un pequeño transitorio la variable conmuta entre dos valores continuamente. Esta conmutación es la que garantiza que las variables de estado del observador se mantengan sobre la superficie de deslizamiento que garantiza que el estado estimado sea igual al estado del modelo.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado el desarrollo de un observador no lineal para la estimación de la cantidad de agua acumulada en el interior de una pila de combustible comercial. La estimación de este parámetro, no medible, es de vital importancia para caracterizar el estado de la pila.

En la actualidad se están realizando la codificación de los algoritmos en el sistema real con el objetivo

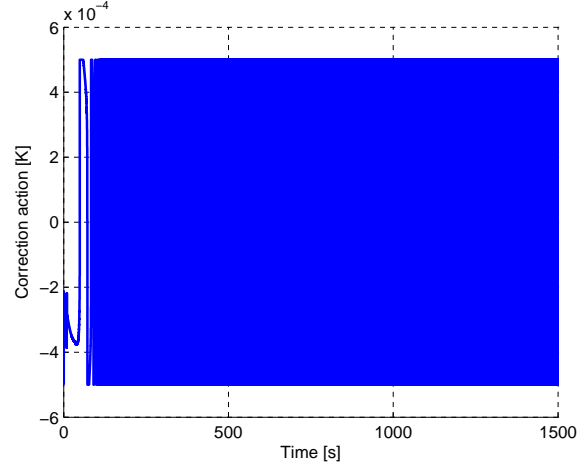


Figura 8: Evolución de la acción de control del observador durante el seguimiento del perfil ARTEMIS (Figura 3).

de validar experimentalmente los desarrollos realizados.

Apéndice A Detalles del modelo

A.1 Parámetros del modelo

$$K_1 = \frac{E_{th} n_{cell}}{m_{fc} C_{p,fc}} \quad (17)$$

$$K'_1 = \frac{1}{m_{fc} C_{p,fc}} \quad (18)$$

$$K_2 = \frac{\rho_{air} A_{inlet} C_{p,air}}{m_{fc} C_{p,fc}} \quad (19)$$

$$K_3 = \frac{M_{H_2O}}{2FA_{geo}\epsilon_{eff}d_{CL}\rho_l K_{sorp}} \quad (20)$$

$$K_4 = \frac{K_{evap} M_{H_2O}}{RA_{pore}\epsilon_{eff}d_{CL}\rho_l K_{sorp}} \quad (21)$$

$$K_5 = \frac{n_{cell} R}{\alpha n F} \quad (22)$$

$$K_6 = n_{cell} R_{ohm} \quad (23)$$

$$K_7 = n_{cell} E_0 \quad (24)$$

$$f_p(T_{fc}) = \frac{1}{T_{fc}} \left[p^0 \exp\left(\frac{-E_a}{k_B T_{fc}}\right) - p^v \right] \quad (25)$$

$$f_d(s) = -\frac{J_{diff}}{\epsilon_{eff} d_{CL} \rho_l K_{sorp}} \quad (26)$$

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos MINECO/FEDER DPI2015-69286-C3-2-R y INN-BALANCE H2020-JTI-FCH-2016-1-735969.

Tabla 1: Valores de las principales constantes físicas

Parámetro	Valor	Unidades
Capacidad térmica específica de la pila de combustible, $C_{p,fc}$	1200	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
Masa de la pila de combustible, m_{fc}	0,3	kg
Densidad del aire @ 20°C, ρ_{air}	1,205	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Capacidad calorífica específica del aire @ 20°C, $C_{p,air}$	1005	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Sección eficaz de la estructura del cátodo, A_{inlet}	$8,5e^{-3}$	m^2
Potencial teórico @ $T^{ref} = 25^\circ\text{C}$ y $P^{ref} = 1\text{atm}$, E_{th}	1,23	V
Número de celdas en la pila, n_{cell}	370	—
Densidad de corriente de intercambio intrínseco del Pt, i_0^{ref}	$5e^{-3}$	$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$
Coefficiente de transferencia de carga, α	0,28	—
Barrera de activación para el ORR en Pt, ΔG^*	70000	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
Saturación óptima alcanzable del agua líquida, s^{opt}	0,165	—
Superficie geométrica del catalizador, A_{geo}	$22,5e^{-4}$	m^2
Resistencia óhmica de la pila, R_{ohm}	0,7	Ω
Presión parcial de oxígeno en el cátodo, p_{O_2}	$0,21 \cdot P^{ref}$	Pa
Porosidad efectiva, ϵ_{eff}	0,5	—
Permeabilidad efectiva, K_{eff}	$1e^{-14}$	m^2
Densidad de agua líquida, ρ_l	970	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Viscosidad del agua líquida, μ_l	$3,517e^{-4}$	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
Tensión superficial líquida del agua, σ	0,0625	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
Ángulo efectivo de contacto, θ	91	°
Espesor eficaz de los medios de difusión, d_{diff}	$0,41e^{-3}$	m
Volumen de la capa catalítica, V_{CL}	$2,25e^{-8}$	m^3
Espesor de la capa catalítica, d_{CL}	$0,01e^{-3}$	m
Constante de tiempo de absorción, K_{sorp}	360	—
Constante de tiempo de evaporación, K_{evap}	$8,6e^5$	—
Factor pre-exponencial, p^0	$1,196e^{11}$	Pa
Energía de activación de la evaporación, E_a	0,449	eV
Constante de Boltzmann, k_B	$8,617e^{-5}$	$\text{eV} \cdot \text{K}^{-1}$
Presión ambiente del cátodo, P_{amb}	$1,013e^5$	Pa
Temperatura ambiente del cátodo, T_{amb}	298	K
Presión de vapor ambiente del cátodo @ 75%RH, p^v	2380	Pa
Superficie de poro por unidad de volumen, A_{pore}	$2e^7$	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$

Referencias

- [1] BAVARIAN, M., SOROUSH, M., KEVREKIDIS, I. G., AND BENZIGER, J. B. Mathematical modeling, steady-state and dynamic behavior, and control of fuel cells: a review. *Industrial & engineering chemistry research* 49, 17 (2010), 7922–7950.
- [2] DAVILA, J., FRIDMAN, L., PISANO, A., AND USAI, E. Finite-time state observation for non-linear uncertain systems via higher-order sliding modes. *International Journal of Control* 82, 8 (2009), 1564–1574.
- [3] FUELCELL STORE. *H-100 Fuel Cell Stack. User Manual*.
- [4] HE, W., LIN, G., AND VAN NGUYEN, T. Diagnostic tool to detect electrode flooding in proton-exchange-membrane fuel cells. *AIChE Journal* 49, 12 (2003), 3221–3228.
- [5] JENSEN, S. H., LARSEN, P. H., AND MOGENSEN, M. Hydrogen and synthetic fuel production from renewable energy sources. *International Journal of Hydrogen Energy* 32, 15 (2007), 3253–3257.
- [6] LEVANT, A. Quasi-continuous high-order sliding-mode controllers. In *Decision and Control, 2003. Proceedings. 42nd IEEE Conference on* (2003), vol. 5, IEEE, pp. 4605–4610.
- [7] LUNA, J., JEMEI, S., YOUSFI-STEINER, N., HUSAR, A., SERRA, M., AND HISSEL, D. Nonlinear predictive control for durability enhancement and efficiency improvement in a fuel cell power system. *Journal of Power Sources* 328 (2016), 250–261.
- [8] LUNA, J., USAI, E., HUSAR, A., AND SERRA, M. Nonlinear observation in fuel cell systems: A comparison between disturbance estimation and high-order sliding-mode techniques. *International Journal of Hydrogen Energy* 41, 43 (2016), 19737–19748.
- [9] MAYUR, M., STRAHL, S., HUSAR, A., AND BESSLER, W. G. A multi-timescale modeling methodology for pemfc performance and durability in a virtual fuel cell car. *International Journal of Hydrogen Energy* 40, 46 (2015), 16466 – 16476.
- [10] PASAOGULLARI, U., AND WANG, C. Liquid water transport in gas diffusion layer of polymer electrolyte fuel cells. *Journal of the Electrochemical Society* 151, 3 (2004), A399–A406.
- [11] PETRONE, R., ZHENG, Z., HISSEL, D., PÉRA, M.-C., PIANESE, C., SORRENTINO, M., BECHERIF, M., AND YOUSFI-STEINER, N. A review on model-based diagnosis methodologies for pemfcs. *International Journal of Hydrogen Energy* 38, 17 (2013), 7077–7091.
- [12] SHARAF, O. Z., AND ORHAN, M. F. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32 (2014), 810–853.
- [13] SLOTINE, J.-J. E., LI, W., ET AL. *Applied nonlinear control*, vol. 199. prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1991.
- [14] STRAHL, S., AND COSTA-CASTELLÓ, R. Model-based analysis for the thermal management of open-cathode proton exchange membrane fuel cell systems concerning efficiency and stability. *Journal of Process Control* 47 (2016), 201–212.
- [15] STRAHL, S., AND COSTA-CASTELLÓ, R. Model-based analysis for the thermal management of open-cathode proton exchange membrane fuel cell systems concerning efficiency and stability. *Journal of Process Control* 47 (2016), 201 – 212.
- [16] STRAHL, S., HUSAR, A., PULESTON, P., AND RIERA, J. Performance improvement by temperature control of an open-cathode pem fuel cell system. *Fuel Cells* (2014), 1–3.
- [17] STRAHL, S., HUSAR, A., RIERA, J., AND COSTA CASTELLÓ, R. Control de temperatura en pilas de combustible tipo pem de cátodo abierto. In *Actas de las XXXV Jornadas de Automática* (Valencia, Septiembre 2014), Comité Español de Automática (CEA-IFAC), pp. 215–221. ISBN-13: 978-84-697-0589-6.
- [18] YOUSFI-STEINER, N., MOÇOTÉGUY, P., CANDUSSO, D., HISSEL, D., HERNANDEZ, A., AND ASLANIDES, A. A review on pem voltage degradation associated with water management: Impacts, influent factors and characterization. *Journal of power sources* 183, 1 (2008), 260–274.

Control Predictivo Basado en Datos

J.M. Manzano*, D. Limon*, T. Alamo*, J.P. Callies**

*Universidad de Sevilla. josmancre@alum.us.es, dlm@us.es, talamo@us.es

**University of Cambridge. jpc73@cam.ac.uk

Resumen

Este artículo presenta el diseño estabilizante de un controlador predictivo a partir únicamente de datos de entrada-salida de un sistema a controlar. El modelo que incluye este controlador es una función no lineal estimada usando una técnica de aprendizaje automático no paramétrica conocida como Kinky Inference. Como primeras pruebas en esta nueva línea de investigación, se diseñan y se prueban controladores en un reactor continuamente agitado, considerando las cuestiones necesarias para una correcta implementación práctica.

Palabras clave: Control predictivo; Control basado en datos; Aprendizaje automático; Sistemas no lineales con restricciones.

1. Introducción

El control predictivo basado en modelo (MPC, por sus siglas en inglés) es una técnica de control no lineal capaz de controlar un sistema garantizando la satisfacción de restricciones duras [6], tanto en las entradas manipulables como en las variables controladas. Para ello el controlador cuenta con un modelo dinámico del sistema, que se usa para predecir el comportamiento esperado del mismo ante una secuencia de acciones futuras prevista. Las predicciones obtenidas permiten estimar el coste asociado a la trayectoria prevista así como el grado de satisfacción de las restricciones impuestas. De esta forma, es posible calcular la secuencia de acciones futuras que logren un menor coste de operación satisfaciendo las restricciones, mediante la resolución de un problema de optimización estática. Con el fin de dotar de realimentación al sistema y obtener mejores predicciones, se aplica tan sólo la acción calculada correspondiente al instante actual, descartando el resto. De esta forma, en cada tiempo de muestreo se actualiza la información necesaria para realizar las predicciones, actuando ante posibles errores de modelado. Esta es la llamada estrategia de horizonte deslizante.

El control predictivo ha logrado un notable éxito en la práctica gracias a su carácter óptimo y a su

capacidad de manejar las restricciones. Este éxito se ha dado principalmente en las aplicaciones en las que se dispone de modelos de predicción fiables, típicamente de primeros principios.

Al ser un controlador basado en modelo, los errores de modelado inducen errores en las predicciones y por lo tanto en la toma de decisiones. Por ello, la disponibilidad de buenos modelos de predicción es clave en el diseño de controladores predictivos. Cuando los modelos de primeros principios no resultan adecuados para realizar predicciones, se pueden inferir modelos de predicción a partir de datos históricos disponibles. Típicamente esto se lleva a cabo mediante técnicas de identificación de sistemas dinámicos, especialmente adecuadas para modelos lineales en torno a un punto de operación [3].

El objetivo de este artículo es estudiar el desarrollo de controladores predictivos que sean capaces de controlar la planta a partir de datos históricos disponibles del sistema a controlar. Mediante técnicas de aprendizaje automático, se van a inferir procedimientos para calcular las predicciones a partir de las cuales se determinará un controlador predictivo, de forma que el controlador resultante se basará directamente en los datos de entrada-salida de la planta a controlar. En [1] se propone usar técnicas de aprendizaje automático para estimar las incertidumbres globales del sistema con el fin de mejorar las predicciones. En [7] se propone un controlador predictivo no lineal basado en datos usando técnicas de interpolación de Lipschitz asumiendo que se conoce de antemano la constante de Lipschitz del sistema. En este trabajo nos vamos a centrar en técnicas de inferencia basadas en la interpolación de Lipschitz (extendidas a funciones con continuidad de Hölder) que no requieren un conocimiento previo de las constantes de Lipschitz [4]. Se van a presentar los trabajos preliminares que demuestran que estas técnicas son adecuadas para el desarrollo de controladores predictivos basados únicamente en datos.

Notación Sean dos espacios, \mathcal{X} e \mathcal{Y} , se definen las pseudo-métricas $\mathfrak{d}_{\mathcal{X}}(\cdot, \cdot) : \mathcal{X}^2 \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ y $\mathfrak{d}_{\mathcal{Y}}(\cdot, \cdot) : \mathcal{Y}^2 \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ como simétricas, positivas, y que cumplen la desigualdad triangular.

2. Kinky Inference: el predictor

Como se ha comentado, el objetivo de esta investigación es el desarrollo de controladores predictivos cuyo modelo está únicamente basado en datos. Este modelo será no explícito, generado por un método de aprendizaje automático propuesto por [5] y conocido como Lazily Adapted Constant Kinky Inference (LACKI). Este método se va a usar para aprender un cierto mapa $f : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$ definido entre espacios y pseudo-métricas $(\mathcal{X}, \mathfrak{d}_{\mathcal{X}})$ e $(\mathcal{Y}, \mathfrak{d}_{\mathcal{Y}})$, que se asume es continuo en el sentido de Hölder con una constante de Hölder L^* y exponente α , por lo que para todo $\forall x_1, x_2 \in \mathcal{X}$ cumple la siguiente condición:

$$\mathfrak{d}_{\mathcal{Y}}(f(x_1), f(x_2)) \leq L^* \mathfrak{d}_{\mathcal{X}}(x_1, x_2)^\alpha \quad (1)$$

De dicha función objetivo $f : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$ se conocen ciertas parejas de entradas y salidas (posiblemente ruidosas) que conforman el dataset $\mathcal{D}_n := \{(s_i, \tilde{f}_i) | i = 1, \dots, N_n\}$, siendo \tilde{f} la medida con ruido de f . Aunque se desconoce la función real f , se asume que se conoce la cota del error observacional, dada por $\bar{\epsilon}$, de forma que $\forall x \in \mathcal{X} : \mathfrak{d}_{\mathcal{Y}}(\tilde{f}(x), f(x)) \leq \bar{\epsilon} \in \mathbb{R}_{\geq 0}$.

Dado que tan sólo se dispone de los datos de entrada-salida medidos, resulta necesario estimar una cierta constante que se use como parámetro en el aprendizaje del sistema. En [5] se describen varios métodos para realizarlo. El que consideramos en este artículo incluye un parámetro de regularización, γ , que suaviza la predicción conociendo la cota de ruido observacional $\bar{\epsilon}$. El término *Lazily Adapted Constant* de LACKI hace referencia a la forma de obtener la constante, pues será la mínima que sea válida conforme a los datos \mathcal{D} . Se calcula de la siguiente forma:

$$L(\mathcal{D}_n, \gamma) := \max_{(s, s') \in \mathcal{U}_n} \frac{\mathfrak{d}_{\mathcal{Y}}(\tilde{f}(s), \tilde{f}(s')) - \gamma}{\mathfrak{d}_{\mathcal{X}}^\alpha(s, s')} \quad (2)$$

con $\gamma \geq 2\bar{\epsilon}$. De ahora en adelante se expresará $L(\mathcal{D}_n, \gamma)$ como $L_{\mathcal{D}}$, para simplificar. Esta estimación es siempre menor o igual que la mínima constante de Hölder de la función, $L_{\mathcal{D}} \leq L^*$, y tiende a ésta a medida que aumenta la densidad del conjunto de datos.

A partir únicamente del conjunto de puntos observados, y de la constante $L_{\mathcal{D}}$ (estimada a partir de ese conjunto), se puede realizar la interpolación de Lipschitz para cualquier otro punto $x \notin \mathcal{D}_n$. El estimador \hat{f}_n se construye de la siguiente forma para la componente j -ésima de la función:

$$\hat{f}_j(x; \mathcal{D}_n) = \frac{1}{2} \min_{i=1, \dots, N_n} \tilde{f}_{i,j} + L(\mathcal{D}_n) \mathfrak{d}_{\mathcal{X}}^\alpha(x, s_i)$$

$$+ \frac{1}{2} \max_{i=1, \dots, N_n} \tilde{f}_{i,j} - L(\mathcal{D}_n) \mathfrak{d}_{\mathcal{X}}^\alpha(x, s_i) \quad (3)$$

Es importante destacar que el error de estimación del predictor de KI, definido como $\mu = \mathfrak{d}_{\mathcal{Y}}(f, \hat{f})$, tiende a cero a medida que aumenta la densidad de los puntos de entrada, siendo capaz de estimar el mapa verdadero $f(\cdot)$ con un error arbitrariamente pequeño a partir de un conjunto de datos suficientemente denso, siempre que el mapa real sea continuo en el sentido de Hölder.

3. Control predictivo basado en datos

Se desea desarrollar un controlador predictivo que permita controlar un sistema del cual tan sólo se dispone de las medidas de las variables a controlar $y(k)$, definidas en el espacio $\mathcal{Y} = \mathbb{R}^n$, y de las variables manipulables $u(k)$, definidas en el espacio $\mathcal{U} \subseteq \mathbb{R}^m$. Realizando una hipótesis no muy restrictiva, se asume que el sistema se puede describir mediante un modelo ARX, con las características descritas en [9], de forma que

$$y(k+1) = f(x(k), u(k)) + e(k) \quad (4)$$

donde $x(k) = [y(k), \dots, y(k - n_a), u(k - 1), \dots, u(k - n_b)] \in \mathcal{X} := \mathcal{Y}^{(n_a+1)} \times \mathcal{U}^{n_b} \subset \mathbb{R}^{n_x}$ con $n_x = (n_a + 1)n + n_b m$, para cierto horizonte de memoria $n_a, n_b \in \mathbb{N}$; y $e(k)$ describe posibles ruidos en las medidas. Nótese que $x(k)$ está definido para $n_b \geq 1$; sin embargo, se contempla la posibilidad de tener $n_b = 0$ para indicar que el estado no depende de las acciones de control pasadas, $x_k \neq x_k(u)$.

En esta sección se desarrollan controladores predictivos para controlar este sistema, del cual no se conoce el modelo $f(\cdot, \cdot)$, sino un conjunto de datos históricos de entrada-salida $\mathcal{D}_n = \{(u(j), y(j)), j = 1, \dots, N_n\}$, obtenido a partir de ensayos previos. El modelo de predicción será el estimador derivado usando la técnica LACKI para aprender el modelo regresivo del sistema. Este predictor permitirá estimar la evolución del sistema para el instante $k+1$ según cierta señal de control u_k dada, y a partir de un conjunto de variables pasadas (el regresor x_k) y el dataset \mathcal{D}_n , que se considera fijo y con el que se estima la $L_{\mathcal{D}}$:

$$\hat{y}(k+1) = \hat{f}(x(k), u(k); \mathcal{D}_n, L_{\mathcal{D}}) \quad (5)$$

Así, el modelo de predicción en variables de estado, en el instante k , para una secuencia de acciones futuras (\hat{u}_0, \dots) , vendrá dado por:

$$\hat{x}(j+1|k) = \hat{F}(\hat{x}(j|k), \hat{u}(j)) \quad (6)$$

$$\hat{y}(k|j) = M\hat{x}(j|k) \quad (7)$$

siendo

$$\hat{x}(j|k) = (\hat{y}(j|k), \dots, \hat{y}(1|k), y(k), \dots, y(k+j-n_a), \hat{u}(j-1), \dots, \hat{u}(j-n_b))$$

y la función del modelo $\hat{F}(\hat{x}(j|k), u(k+j))$ es

$$\begin{aligned} &(\hat{f}(\hat{x}(j|k), u(k+j); \mathcal{D}_n, L_{\mathcal{D}}), \\ &\hat{y}(j|k), \dots, y(k), \dots, \\ &y(k+j-n_a+1), \dots, \\ &u(k+j), \dots, u(k+j-n_b+1)) \end{aligned}$$

y $M = [I_n, 0, \dots, 0]$.

Para derivar el controlador predictivo se debe definir una función de coste de etapa, que en este caso se ha elegido como una función cuadrática que penalice el error de seguimiento de las entradas y salidas respecto al punto de referencia en el que se quiere estabilizar el sistema, dado por (y_r, u_r) . Se obtiene así $x_r = (y_r, \dots, y_r, u_r, \dots, u_r) \in \mathbb{R}^{n_a+1+n_b}$. Dicho coste de etapa se define a continuación:

$$\ell(y, u) = (y - y_r)^T Q (y - y_r) + (u - u_r)^T R (u - u_r) \quad (8)$$

Por todo ello el problema de optimización $P_{N_p, N_c}(x(k), \mathcal{D}_n)$ a resolver es el siguiente [13]:

$$\begin{aligned} \min_{\hat{\mathbf{u}}} \quad & V_{N_p, N_c}(x(k), \hat{\mathbf{u}}) = \sum_{i=0}^{N_c-1} \ell(\hat{y}(i|k), \hat{u}(i)) \\ & + \sum_{i=N_c}^{N_p-1} \ell(\hat{y}(i|k), \kappa_f(\hat{x}(i|k))) + \lambda V_f(\hat{x}(N_p|k)) \\ \text{s.a.} \quad & \hat{x}(0|k) = x(k) \\ & \hat{x}(j+1|k) = \hat{F}(\hat{x}(j|k), \hat{u}(j)), \quad j \in \mathbb{I}_{0, N-1} \\ & \hat{y}(j|k) = M\hat{x}(j|k) \\ & \hat{u}(j) \in \mathcal{U} \end{aligned} \quad (9)$$

siendo λ una constante mayor que 1 que es un parámetro del controlador. N_p es el horizonte de predicción, N_c el de control; y κ_f la ley de control terminal. La ley de control será $u(k) = \kappa_{MPC}(x(k); \mathcal{D}_n) = \hat{u}^*(0)$.

Para garantizar la estabilidad nominal por diseño, se ha añadido una función de coste terminal cuadrática $V_f(x) = (x - x_r)^T P (x - x_r)$ y una ley de control terminal lineal $\kappa_f(x) = K(x - x_r) + u_r$, siendo K la solución del LQR. Estos términos se pueden diseñar de la forma estándar [10] a partir del modelo linealizado obtenido numéricamente de la función de predicción. Como se demuestra en [11], esta ley control garantiza la estabilidad para cualquier $\lambda \geq 1$ con un dominio de atracción que crece al aumentar λ . Además, gracias a la continuidad de Hölder de los ingredientes del problema

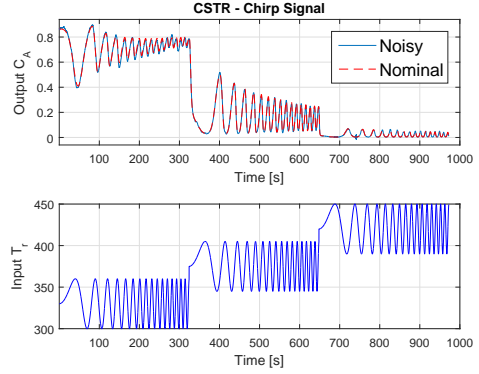


Figura 1: Ensayo para la obtención de datos

de optimización, se puede demostrar que el sistema controlado es estable entrada-estado respecto a los errores de estimación del predictor [12].

4. Caso de estudio

En las secciones anteriores se ha expuesto la teoría necesaria para el desarrollo de un controlador predictivo, estabilizante por diseño, basado íntegramente en datos. El objetivo de este artículo es aplicar dichas metodologías a un caso de estudio que motive la investigación llevada a cabo. Se pretende validar dichas ideas con casos realistas, mediante ensayos realmente implementables.

Como primer trabajo dentro del proyecto de investigación, se está desarrollando un controlador para un **reactor continuamente agitado** (CSTR, por sus siglas en inglés), presentando en [15]. Esta sección analiza el diseño de los experimentos, desde la obtención de los datos y la construcción del predictor hasta el control del sistema bajo determinadas condiciones.

4.1. Obtención de los datos

Se parte de un modelo de caja negra del reactor, que recibe como entrada la temperatura del refrigerante T_r [K] y proporciona como salida la concentración del reactivo a controlar, CA . Las restricciones en la entrada son $300 \leq T_r \leq 450$, y no se consideran restricciones en los estados o la salida. Se simula además con un ruido en las señales de hasta el 3,5%. Es nuestro objetivo realizar un ensayo en el reactor que proporcione un conjunto de datos con información suficiente para poder diseñar posteriormente el controlador.

La primera parte del problema consiste entonces en aplicar técnicas basadas en la **identificación de sistemas**. Se estudia la característica estática del sistema y sus dinámicas principales, para diseñar posteriormente un ensayo de acuerdo con las

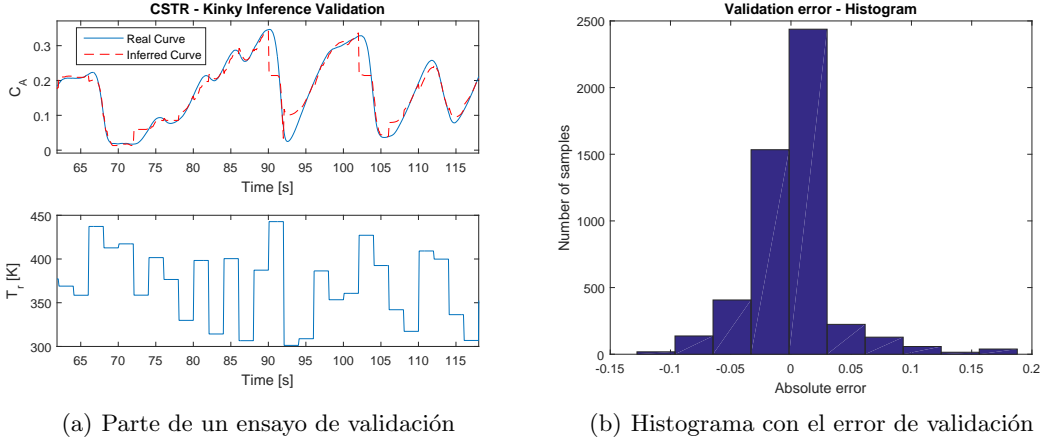


Figura 2: Muestra del funcionamiento del predictor. En (a) se muestra la respuesta del sistema y la del predictor frente a una misma señal de entrada aleatoria. En (b) se realiza un histograma del error de predicción: $\mu = \mathfrak{D}_Y(\tilde{f}, \hat{f})$

metodologías seguidas en [14]. Este ensayo estará compuesto por la superposición de varias señales chirp como entrada, con frecuencias variando entre 0.1 mHz y 0.1 Hz y amplitud suficiente con cierto solape entre ellas para cubrir todo el espacio de interés. El resultado es el representado en la Figura 1.

Se obtienen además varios ensayos generados por señales de entrada aleatorias, que serán usados como ensayos de validación. Los siguientes pasos consisten en obtener un dataset \mathcal{D} válido para la interpolación, y una estimación de la constante de Lipschitz del sistema. Para ello es necesario cierto procesamiento de los datos obtenidos con el ensayo mostrado en la Figura 1. Esto incluye el escalado de las señales y el esquilmo de los datos, pues el ensayo de la señal chirp contenía cerca de 10000 puntos. Se aplica un filtro para obtener dos datasets menores: D_1 con 297 puntos, y D_2 con 895 puntos.

En primer lugar debe construirse el modelo dinámico del sistema. Haciendo uso del modelo autorregresivo presentado en (4), podemos expresar la concentración en cierto instante como una función de los valores pasados de temperaturas (u), y concentraciones (y):

$$y_{k+1} = F(x_k, u_k) \quad (10)$$

siendo F la función que se desea aprender (obtenemos el estimador \hat{F}), u_k la señal de control en ese mismo instante y x_k el vector de regresión en el instante k , dado por:

$$x_k := [y_k, y_{k-1}, \dots, y_{k-n_a}, u_{k-1}, \dots, u_{k-n_b}] \quad (11)$$

El siguiente paso por tanto es la construcción de

este regresor con los valores indicados en (11) para todos los puntos del dataset \mathcal{D} obtenido en el ensayo mostrado en la Figura 1. Cada punto está por tanto compuesto por $\{\tilde{f}_k, s_k\}$, donde $\tilde{f}_k = y_{k+1}$ y $s_k = (x_k, u_k)$.

Puede así estimarse la constante de Lipschitz del sistema aplicando la ecuación (2), si fueran dados los parámetros n_a y n_b ; y obtener por consiguiente el predictor, definido en la ecuación (3). Puede comprobarse su bondad mediante ensayos de validación, usando los datasets aleatorios obtenidos previamente (ver Figura 2).

Estos ensayos de validación sirven, entre otras funciones, para determinar los valores óptimos de los parámetros n_a y n_b . Para $n_a = 2$ y $n_b = 0$ se minimiza el error de validación (diferencia entre la concentración real del sistema y la estimada por el predictor, ante la misma señal de entrada). Con estos valores y con $\gamma = 2\bar{\epsilon}$ (recuérdese que $\bar{\epsilon}$ se asume conocida) se obtiene una $L_{\mathcal{D}} = 1,563$. Nótese que según se ha definido el modelo autorregresivo en (4), es posible el valor $n_b = 0$, pues la señal de control actual, u_k , está definida fuera del regresor x_k .

4.2. Control del reactor

Se aborda entonces el problema de control presentado en la Sección 3. Se ha implementado un controlador predictivo en MatLab usando la función de optimización *fmincon*. Las ecuaciones que gobiernan este MPC son las expresadas en (9).

Para el ensayo se fija el estado inicial en el punto de equilibrio dado por $y = 0,7509$. La referencia se fija en otro punto de equilibrio dado por $y = 0,25$, aunque se construye un SSTO por si esta referencia no fuera alcanzable. Se considerará un

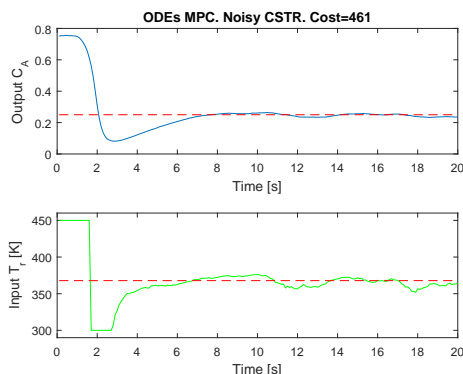


Figura 3: MPC ideal en el que se conociese el modelo del sistema, para ilustrar el control objetivo

coste de etapa cuadrático, con $Q = 100$ y $R = 5$; y se definen las restricciones en la entrada y el coste terminal como se indica en la sección 3.

Para dar una idea al lector del objetivo del control; se realiza un primer experimento en el que el modelo usado por el MPC es la propia planta (definida por su conjunto de ecuaciones diferenciales u ODEs) a la que luego se aplica la señal de control. Nótese que este modelo de la planta, para el resto del artículo, es desconocido; es decir, sólo se ha utilizado aquí para obtener una idea de cómo sería un controlador óptimo que conociese el sistema. Este resultado se muestra en la Figura 3. Sin embargo, como se ha indicado previamente, este modelo de ODEs es desconocido, de caja negra, por lo que experimentalmente sólo hemos podido obtener un conjunto de datos a partir de señales de entrada.

Basándose en los datos se ha obtenido el predictor como se indica en las secciones 2 y 3. Los resultados de este controlador aplicado sobre el CSTR se muestran en la Figura 4. Como se puede observar, los resultados no son satisfactorios. Esto se debe a problemas de implementación que se analizan en la siguiente sección.

4.3. Mejoras en la implementación

Como parte experimental de la teoría presentada en [13], ciertos aspectos prácticos surgen a la hora de implementar los controladores allí definidos. En este apartado se analizan posibles modificaciones para reducir la carga computacional y para mejorar la actuación del optimizador.

4.3.1. Partición en árboles

El propósito de esta línea de investigación es el manejo de una cantidad de datos suficiente no sólo

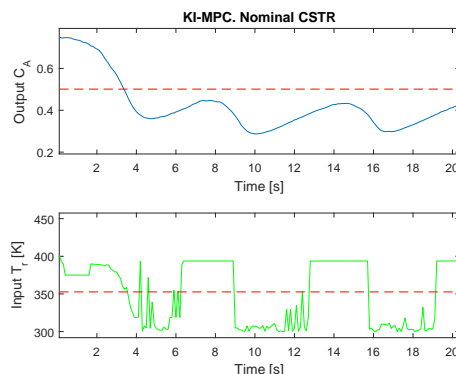


Figura 4: Primeros ensayos realizados usando el predictor KI, con problemas en la resolución del optimizador

para explorar toda la región de trabajo, sino también para proporcionar una predicción veraz y con error acotado, que permita manejar sistemas no lineales con restricciones. Los modelos de predicción presentados, basados en datos, requieren un dataset que a menudo no es pequeño, y que puede contar con numerosas dimensiones (tanto en entrada como en salida) dado el carácter dinámico y multivariable de los sistemas considerados.

Por todo ello, creemos necesario desarrollar metodologías que reduzcan la carga computacional de los algoritmos, y poder así implementar un control en tiempo real. Una de estas metodologías consiste en dividir el espacio de trabajo con técnicas de aprendizaje automático como *clustering* o *nearest neighbors*. Cierta bibliografía respecto a este tema puede encontrarse en [2], [4] y [8].

En este trabajo se han realizado particiones iguales en el espacio de entrada $\mathcal{X} \in \mathbb{R}^3$ del dataset \mathcal{D}_n , de forma que un nuevo punto a interpolar $x \notin \mathcal{D}_n$ se situará primero en la división que le corresponde, y se realizará la predicción utilizando solamente un subconjunto de \mathcal{D}_n alrededor de x .

Dividiendo en 10 particiones por cada dimensión del regresor, el tiempo de cálculo se reduce hasta un 90 %, sin aumentar el error de predicción, $\mu = \mathfrak{d}_Y(\tilde{f}, \hat{f})$.

4.3.2. Filtrado del predictor

El término *Kinky Inference* hace referencia al resultado del predictor descrito en la ecuación (3). Debido al tipo de interpolación que se hace basada en los datos y la continuidad de Lipschitz, la función resultante \hat{f} no es diferenciable, sino que presenta una forma angulosa, que propicia el término *kinky* en inglés.

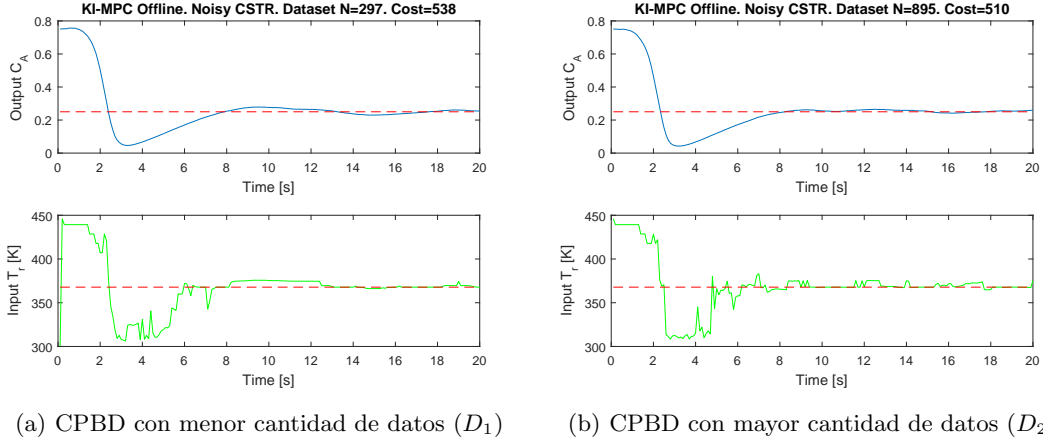


Figura 5: Control predictivo basado en datos para un reactor CSTR, proporcionando al modelo datasets con diferente tamaño

Esta función forma parte del problema de optimización, y el hecho de ser no diferenciable perjudica gravemente los métodos de optimización gradenciales como la función *fmincon*. Es nuestro objetivo, por tanto, suavizar o filtrar de cierta forma esta \hat{f} para convertirla en diferenciable, manteniendo la misma L_D .

En [4] se propone una nueva versión del predictor conocida como *smoothed kinky inference* (SKI), que consiste en realizar una combinación convexa de ciertos puntos alrededor del punto x a interpolar, como se indica a continuación:

$$f_n^*(x) = \frac{1}{\sum_{i=-q}^q w_i} \sum_{i=-q}^q w_i \hat{f}_n(x + i\sigma_n) \quad (12)$$

para q puntos alrededor de x con pesos w_i y siendo σ_n un vector en \mathbb{R}^{n_x} que indica el incremento en cada componente dimensional.

En la Figura 5 se muestra el resultado de los experimentos tras aplicar las mejoras citadas en esta sección. Se realiza además con diferentes datasets, con el objetivo de demostrar que con más datos se mejora la actuación, y motivando la teoría presentada en [13].

5. Conclusiones y futuras líneas

Se han presentado las primeras líneas para el proyecto de investigación de controladores predictivos basados en datos. A partir de los problemas desarrollados en [13], se ha considerado un reactor continuamente agitado como modelo de caja negra, por lo que ha sido necesario diseñar el método para obtener el predictor, mediante técnicas de identificación. Se ha construido el modelo NARX,

y estimando la constante de Lipschitz se ha construido el predictor de KI. Posteriormente se ha diseñado un MPC usando ese modelo, y se han realizado ensayos de control. Se proponen algunas de mejoras y se muestran los resultados obtenidos, aplicados al CSTR.

Como se comentaba, este artículo representa una primera aproximación al control basado en datos. Experimentalmente, algunos de los próximos pasos a seguir en esta línea comprenden:

- La adaptación de los algoritmos al control robusto, sin pérdida de generalidad ni de estabilidad.
- La versión *online*, o en línea, del controlador. Es nuestro objetivo tener en cuenta nuevos puntos que vayan surgiendo durante la operación del sistema, y que permitan mejorar nuestro controlador. Destacamos tres usos:
 - Para actualizar la constante de Lipschitz del sistema. Como se comentaba en la sección 2, la estimación de L_D a partir de los datos es menor o igual que la real, por lo que nuevos datos permitirán un cálculo recursivo para mejorar dicha estimación.
 - Para añadir puntos al dataset con los que mejorar la interpolación. Se deberá llegar a un compromiso entre reducir el error de predicción y aumentar la carga computacional por el incremento del dataset.
 - Para explorar regiones del espacio \mathcal{X} no contempladas en \mathcal{D}_n , si bien deberá hacerse sin incrementar el error de estimación.
- Seguir implementando técnicas para reducir la carga computacional de los algoritmos,

pues al realizar la interpolación entre puntos el tiempo de cálculo dista del deseado. Una técnica a estudiar será la paralelización de estos algoritmos.

Agradecimientos

A los autores les gustaría agradecer al MINECO y a los fondos FEDER (contratos DPI2013-48243-C2-2-R y DPI2016-76493-C3-1-R) por financiar este trabajo.

Referencias

- [1] Aswani, A., Gonzalez, H., Sastry, S.S., & Tomlin, C. (2013). *Provably safe and robust learning-based model predictive control*. Automatica, 49(5), 1216–1226.
- [2] Beliaikov, G. (2006). *Interpolation of Lipschitz functions*. Journal of Computational and Applied Mathematics, 196(1), 20–44.
- [3] Bravo, J.M. et al. (2016). *A General Framework for Predictors based on Bounding Techniques and Local Approximation*. IEEE Transactions on Automatic Control.
- [4] Calliess, J.P. (2014). *Conservative decision-making and inference in uncertain dynamical systems*. Ph.D. Thesis, University of Oxford.
- [5] Calliess, J.P. (2016). *Lazily Adapted Constant Kinky Inference for Nonparametric Regression and Model-Reference Adaptive Control*. arXiv preprint arXiv:1701.00178.
- [6] Camacho, E. F., & Bordons, C. (2013). *Model predictive control*. Springer Science & Business Media.
- [7] Canale, M., Fagiano, L., & Signorile, M.C. (2014). *Nonlinear model predictive control from data: a set membership approach*. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 24(1), 123–139.
- [8] Kvasov, D. & Sergeyev, Y. (2012). *Lipschitz gradients for global optimization in a one-point-based partitioning scheme*. Journal of Computational and Applied Mathematics, 236(16), 4042–4054.
- [9] Leontaritis, I.J. & Billings, S.A. (1985). *Input-output parametric models for nonlinear systems. Part I: deterministic nonlinear systems*. International Journal of Control 41:303-328.
- [10] Limon, D. (2002). *Control predictivo de sistemas no lineales con restricciones: estabilidad y robustez*. Tesis doctoral, Universidad de Sevilla.
- [11] Limon, D., Alamo, T., Salas, F., & Camacho, E.F. (2006). *On the stability of MPC without terminal constraint*. IEEE Transactions on Automatic Control, 51(5), 832–836.
- [12] Limon, D., Alamo, T., et al. (2009). *Input-to-state stability: a unifying framework for robust model predictive control*. International Workshop on Assessment and Future Direction of Nonlinear Model Predictive Control, L. Magni, D. M. Raimondo, & F. Allgöwer, Eds. Springer, 2009, pp. 1–26.
- [13] Limon, D., Callies, J.P., Maciejowski, J.M. (2017). *Learning-based Nonlinear Model Predictive Control*. IFAC World Congress, Toulouse, Francia.
- [14] Rivera, D.E. & Kyoung S. (2000) *An integrated identification and control design methodology for multivariable process system applications*. IEEE Control Systems, 20(3), 25–37.
- [15] Seborg, D. E., Edgar, T. & Mellichamp, D. (1989). *Process Dynamics and Control*, Wiley, 3ª Edición, Capítulo 2.4.6.

Control MPC basado en un modelo LTV para seguimiento de trayectoria con estabilidad garantizada

Sara Mata, Asier Zubizarreta, Ione Nieva, Itziar Cabanes, Charles Pinto

sara.matac@ehu.eus, asier.zubizarreta@ehu.eus, ione.nieva@gmail.com, itziar.cabanes@ehu.eus, charles.pinto@ehu.eus

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática,

Escuela Superior de Ingeniería de Bilbao, UPV/EHU

Resumen

Este artículo presenta una aplicación de seguimiento de trayectoria para vehículos mediante Control Predictivo basado en Modelo (MPC) con un modelo Linealmente Variable en el Tiempo (LTV) con estabilidad garantizada. El sistema de control considera tanto el error lateral como el error de orientación respecto de la trayectoria de referencia para garantizar un correcto seguimiento de la trayectoria bajo ciertos criterios de confort. Además, también se consideran restricciones estrictas en la señal de control, en la variación de la señal de control y en el error lateral de seguimiento de la trayectoria, así como se tienen en cuenta consideraciones de estabilidad. Se exponen los resultados para diferentes tipos de trazados, concluyendo con un circuito y para un rango muy amplio de velocidades.

Palabras clave: MPC, LTV, dinámica lateral, seguimiento trayectoria, estabilidad

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los vehículos incluyen sofisticados sistemas de seguridad activa, que vienen motivados por el desarrollo de nuevas tecnologías de control y percepción durante las últimas décadas [9]. Estos sistemas de seguridad activa tratan de asistir al conductor para controlar el vehículo, especialmente en situaciones de emergencia donde el objetivo principal es evitar accidentes [2].

Los primeros de estos trabajos datan de la década de los 80 y estaban enfocados principalmente a la mejora del comportamiento longitudinal del vehículo. Ejemplos de estos sistemas son el Sistema Antibloqueo de Ruedas o Frenos Antibloqueo (ABS) que mejora la eficiencia de la frenada; o el Control de Tracción (TC) que mejora la estabilidad del vehículo.

Recientes progresos en la tecnología sensorica, como la visión por ordenador, la geolocalización y la reconstrucción de entornos 3D, han impulsado las posibilidades en los sistemas de seguridad activa y han promovido la base para el diseño de sistemas

de guiado avanzados para vehículos autónomos y semiautónomos [1], [18]. Estos sistemas aportan múltiples ventajas en la estabilidad, seguridad y ergonomía de los vehículos: Sistema de Mantenimiento en Carril, que ayudan al conductor a mantener su vehículo dentro del carril y evitar salidas de calzada [4]; Sistemas de Cambio de Carril, para ayudar al conductor a hacer un adelantamiento de forma segura [13]; o Sistemas Anticolisión, que detectan un obstáculo en la calzada y ayudan al conductor a evitarlo de forma segura [19]. De esta forma, el algoritmo de control de los sistemas de seguridad activa calculará una trayectoria objetivo que el controlador de seguimiento de trayectoria tratará de seguir cumpliendo con las restricciones impuestas por el sistema de seguridad.

En la literatura, se pueden encontrar una gran variedad de trabajos relacionados con el control de seguimiento de trayectoria: un controlador PI para la implementación del sistema del control en la dirección [20]; un controlador de lógica Fuzzy para la maniobra de adelantamiento [13] o de seguimiento de trayectoria [7]; una combinación de lógica Fuzzy y controlador PID [14]; o incluso Redes Neuronales [10].

Sin embargo, el esquema de control más extendido para el seguimiento de trayectoria en sistemas automovilísticos es la formulación del Control Predictivo basado en Modelos (MPC), ya que presenta múltiples ventajas para gestionar este tipo de problemas gracias a su capacidad para gestionar modelos no lineales variables en el tiempo y restricciones y operar cerca de los límites admisibles de las entradas y estados [2]. Las formulaciones MPC usan un modelo del sistema para calcular la acción de control óptima, por lo que la complejidad y precisión del modelo empleado para dicho fin es un factor clave. Aunque existen técnicas de control robusto basadas en controladores MPC que debido a su robustez ante imprevistos y su capacidad de rechazar perturbaciones tienen muy buenos resultados [6], éstas son técnicas complejas y por lo tanto computacionalmente exigentes. Por lo que numerosos trabajos están enfocados en la optimización de modelos para MPC, principalmente empleando modelos complejos y no lineales

[2], [5], [16].

En este trabajo se propone un novedoso control MPC con coste computacional eficiente basado en un modelo bicicleta Linealmente Variable en el Tiempo (LTV) para el control de desplazamiento lateral con estabilidad garantizada. En la propuesta se optimizan tanto el desplazamiento lateral como el ángulo de guiñada, aportando un seguimiento de trayectoria más preciso. Además, el uso de un modelo LTV dependiente de la velocidad longitudinal aporta un rango operacional más amplio que el de otros trabajos. A su vez, se implementan estándares de confort imponiendo restricciones en la variación del ángulo de giro de las ruedas.

El resto del artículo se estructura de la siguiente forma: el modelo LTV usado para la predicción de la trayectoria se detalla en el Sección 2; las consideraciones de estabilidad que deben ser implementadas en el controlador MPC se describen en la Sección 3; el control MPC propuesto se presenta en la Sección 4; los resultados de la simulación se discuten en la Sección 5; y finalmente las conclusiones y futuros trabajos se detallan en la Sección 6.

2. MODELO DEL VEHÍCULO

2.1. Definición del modelo de vehículo

La dinámica vehicular se describe mediante el modelo bicicleta, un modelo simplificado de dos grados de libertad (posición lateral y y ángulo yaw ψ) y comúnmente empleado por su bajo coste computacional y buena precisión [15], [17]. Este modelo asume que el vehículo es simétrico, los neumáticos de un mismo eje tienen el mismo ángulo de deslizamiento, se desprecia la dinámica de los ángulos $roll$ y $pitch$ y se asume que los ángulos son pequeños (Figura 1).

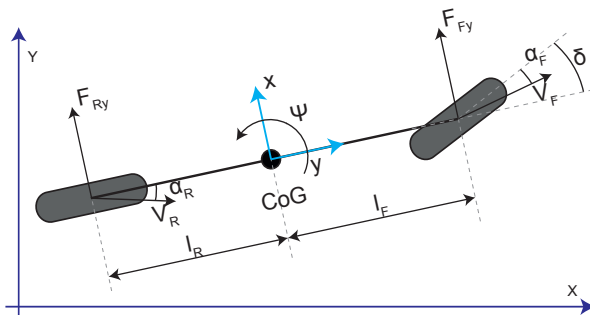


Figura 1: Diagrama del modelo bicicleta de dos grados de libertad

Así, la dinámica lateral se calcula mediante las siguientes ecuaciones diferenciales que describen el movimiento del vehículo,

$$\begin{aligned} m \ddot{y} &= -m \dot{x} \dot{\psi} + F_{Fy} + F_{Ry} \\ I_z \ddot{\psi} &= l_F F_{Fy} - l_R F_{Ry} \end{aligned} \quad (1)$$

donde m es la masa del vehículo, \ddot{y} es la aceleración lateral, \dot{x} la velocidad longitudinal del vehículo, $\dot{\psi}$ y $\ddot{\psi}$ son la velocidad y aceleración yaw alrededor del eje z del vehículo en el Centro de Gravedad (CoG), F_{Fy} y F_{Ry} son las sumas de las fuerzas laterales en los neumáticos delanteros y traseros respectivamente, I_z es el momento inercial alrededor del eje z del vehículo y l_F y l_R son las distancias desde el CoG hasta los ejes delantero y trasero respectivamente (Figura 1).

Las fuerzas laterales del neumático son proporcional al ángulo de deslizamiento, para pequeños ángulos de deslizamiento, de modo que,

$$\begin{aligned} F_{Fy} &= 2 C_{\alpha_F} \alpha_F \\ F_{Ry} &= 2 C_{\alpha_R} \alpha_R \end{aligned} \quad (2)$$

donde F_{Fy} y F_{Ry} son la suma de las fuerzas asociadas a los neumáticos derecho e izquierdo en cada eje, C_{α_F} y C_{α_R} son la rigidez en curva para los neumáticos delanteros y traseros respectivamente y α_F y α_R son los ángulos de deslizamiento. El ángulo de deslizamiento se define como el ángulo entre la orientación del neumático y la orientación del vector velocidad de la rueda (\mathbf{V}_F y \mathbf{V}_R respectivamente). Por lo que, el ángulo de deslizamiento delantero α_F depende del ángulo de giro de las ruedas (δ), mientras que el ángulo de deslizamiento trasero α_R no.

$$\begin{aligned} \alpha_F &= \delta - \frac{\dot{y} + l_F \dot{\psi}}{\dot{x}} \\ \alpha_R &= -\frac{\dot{y} - l_R \dot{\psi}}{\dot{x}} \end{aligned} \quad (3)$$

Combinando las Ecuaciones (1) a (3), se puede definir el modelo lineal de la dinámica vehicular.

2.2. Modelo LTV para control

El modelo descrito en el apartado anterior se puede definir en el espacio de estados mediante la siguiente representación,

$$\dot{\mathbf{x}}_c(t) = \mathbf{A}_c(t) \mathbf{x}_c(t) + \mathbf{B}_c(t) u_c(t) \quad (4)$$

donde el vector de estados es $\mathbf{x}_c(t) = [y(t) \dot{y}(t) \psi(t) \dot{\psi}(t)]^T$ y la variable de control se corresponde con el ángulo de giro de las ruedas $u_c(t) = \delta(t)$. Las matrices $\mathbf{A}_c(t)$ y $\mathbf{B}_c(t)$ describen el modelo del vehículo y están representadas por

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_{c1} & 0 & a_{c2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{c3} & 0 & a_{c4} \end{bmatrix} \quad (5)$$

donde,

$$\begin{aligned} a_{c1} &= -\frac{2C_{\alpha F} + 2C_{\alpha R}}{2l_F C_{\alpha F}^m \dot{x} - 2l_R C_{\alpha R}} - \dot{x} \\ a_{c2} &= -\frac{2l_F C_{\alpha F}^m \dot{x} - 2l_R C_{\alpha R}}{2l_F C_{\alpha F}^m \dot{x} - 2l_R C_{\alpha R}} - \dot{x} \\ a_{c3} &= -\frac{2l_F C_{\alpha F}^m \dot{x} - 2l_R C_{\alpha R}}{I_z \dot{x}} \\ a_{c4} &= -\frac{2l_F^2 C_{\alpha F} + 2l_R^2 C_{\alpha R}}{I_z \dot{x}} \end{aligned}$$

$$\mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2C_{\alpha F}}{m} \\ 0 \\ \frac{2l_F C_{\alpha F}}{I_z} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Nótese que para mejorar la precisión de la predicción de la trayectoria, el modelo de predicción se formula como un modelo Linealmente Variable en el Tiempo (LTV). La velocidad longitudinal \dot{x} medida en cada instante se asume constante durante el horizonte de predicción, por términos de eficiencia computacional. Así, las matrices $\mathbf{A}_c(t)$ y $\mathbf{B}_c(t)$ varían de una predicción a otra pero son constantes durante una predicción.

A su vez, los controladores MPC se basan en tiempo discreto, por lo que el modelo detallado en la Ecuación (4) se discretiza con el método de Retenedor de Orden Cero y un periodo de discretización T_s . La nueva representación viene dada por,

$$\mathbf{x}_d(k+1) = \mathbf{A}_d(k) \mathbf{x}_d(k) + \mathbf{B}_d(k) u_d(k) \quad (7)$$

donde $\mathbf{x}_d(k)$ es el estado, $u_d(k)$ la señal de control y $\mathbf{A}_d(k)$ y $\mathbf{B}_d(k)$ son las matrices discretizadas de las Ecuaciones (5) y (6) respectivamente. Este modelo se puede usar para estimar la futura evolución del estado $\hat{\mathbf{x}}$.

Por último, y con el fin de incluir un término integrativo en el controlador, la señal óptima que se debe calcular se define como la variación de la acción de control $\Delta u_d(k)$ en lugar de la propia acción de control $u_d(k)$. Esto exige definir un nuevo sistema extendido, donde el vector de estados es $\mathbf{x}_e = [\mathbf{x}_d \ u_d]^T$ y la señal de control $u_e = \Delta u_d$. De esta forma, la Ecuación (7) se reescribe como,

$$\mathbf{x}_e(k+1) = \mathbf{A}_e(k) \mathbf{x}_e(k) + \mathbf{B}_e(k) u_e(k) \quad (8)$$

donde $\mathbf{A}_d(k)$ y $\mathbf{B}_d(k)$ se reorganizan para definir las matrices $\mathbf{A}_e(k)$ y $\mathbf{B}_e(k)$.

$$\mathbf{A}_e(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d(k) & \mathbf{B}_d(k) \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{B}_e(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_d(k) \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (10)$$

3. CONSIDERACIONES DE ESTABILIDAD

A pesar de lo que intuitivamente pueda parecer, la optimalidad de un controlador predictivo no implica que éste sea estable ni que se alcance el punto de operación tal y como se desea. Este problema deriva directamente del propio funcionamiento del control predictivo y de la utilización de un horizonte finito y deslizante.

Para solventar este inconveniente y garantizar la estabilidad de los controladores predictivos, se han desarrollado una serie de formulaciones basadas en la teoría de estabilidad de Lyapunov. Estas formulaciones tienen una serie de elementos comunes para garantizar la estabilidad de un MPC [12]:

- La inclusión de una región terminal invariante Ω en el problema de optimización. El control predictivo ha de ser capaz de llevar el sistema a una región del espacio de estados que es un conjunto positivo invariante del sistema. Esto es, si el control predictivo logra llevar el sistema a esta región, existe un controlador local que estabiliza el sistema en esta región.
- La inclusión de un coste terminal γ en la función de coste. Se incluye un término adicional en la función de coste para evaluar el estado final. Así, el estado final del sistema en el horizonte de predicción será lo más cercano posible al de la referencia. Este coste terminal se define como una función de Lyapunov que garantiza que el sistema sea estable en bucle cerrado y con restricciones.

$$\gamma = (\hat{\mathbf{x}}_{H_p} - \mathbf{x}_s)^T \mathbf{P} (\hat{\mathbf{x}}_{H_p} - \mathbf{x}_s) \quad (11)$$

Estas dos consideración se introducen en el controlador MPC para garantizar la estabilidad. Esto se consigue con un controlador de modo dual, donde el MPC gestiona los instantes finitos del horizonte de predicción y un controlador local con realimentación gestiona el resto de los instantes. El controlador de modo dual es el equivalente a resolver un problema de optimización con horizonte de predicción infinito [12].

El controlador de modo dual que se emplea es un Linear Quadratic Regulator (LQR), un regulador óptimo con horizonte infinito. De forma que la matriz de ponderación \mathbf{P} que se incluye en el coste terminal en la función de coste se sintoniza mediante la ecuación de Riccati asociada al controlador LQR. Por otro lado, la restricción terminal Ω está relacionada con la ganancia \mathbf{K} del controlador LQR. El conjunto invariante Ω asegura que una vez que el estado está dentro de este conjunto, el controlador LQR garantiza la convergencia hacia el origen, esto es

$$x(k) \in \Omega \Rightarrow x(k+1) = A_a x(k) \in \Omega, \forall x(k) \in \Omega \quad (12)$$

donde $x(k+1) = A_a x(k)$ es el estado autónomo de la ecuación asociada al sistema controlado por el controlador LQR y donde $A_a = [A + BK]$.

Así, si el sistema es lineal y el punto de equilibrio \mathbf{x}_s es conocido, la restricción terminal queda definida como,

$$\mathbf{x}_e(\mathbf{H}_p) \in \Omega_s = \Omega \oplus \mathbf{x}_s \quad (13)$$

donde $\mathbf{x}_e(\mathbf{H}_p)$ es el estado asociado al instante final en el horizonte de predicción y Ω_s es el conjunto invariante entorno al punto de equilibrio.

Nótese que el modelo empleado es dependiente del tiempo y dado que el conjunto invariante Ω depende de dicho modelo, éste también será variable en el tiempo. Para solventarlo, se propone una simple consideración. El rango de velocidades longitudinales efectivas se divide en varios intervalos. Los límites de estos intervalos se calcularán dependiendo de la capacidad de aceleración y frenado del vehículo, de esta forma, en cada intervalo se cubrirían todas las posibles velocidades que pudiera alcanzar el vehículo en el horizonte de predicción.

De esta forma, se puede calcular un único conjunto invariante Ω_i para cada intervalo de velocidad. Estos conjuntos invariantes se calculan como la intersección entre el conjunto invariante para el sistema de los límites superior e inferior. Todos estos conjuntos invariantes se calcularían offline, y para cada instante de muestreo, se comprobaría la velocidad del vehículo y se seleccionaría el intervalo correspondiente. Esta consideración se detallará mejor en la posterior Sección 5.

4. LEY DE CONTROL

Se propone un sistema de seguimiento de trayectoria basado en un control MPC para el guiado lateral del vehículo. El controlador propuesto es una mejora de la formulación clásica [3]. Esta nueva formulación penaliza las desviaciones respecto

de la trayectoria de referencia deseada y la desviación del ángulo de guiñada deseado. Además, la función de coste se aumenta con la inclusión del término de coste terminal γ para asegurar que el estado final del sistema predicho $\hat{\mathbf{x}}_{\mathbf{H}_p}$ es lo más próximo posible al de referencia \mathbf{x}_s , tal y como se detalla en la Sección 3.

$$J(H_p, H_c) = (\hat{\mathbf{x}}_e - \mathbf{w})^T \mathbf{Q} (\hat{\mathbf{x}}_e - \mathbf{w}) + \mathbf{u}_e^T \mathbf{R} \mathbf{u}_e + (\hat{\mathbf{x}}_{\mathbf{H}_p} - \mathbf{x}_s)^T \mathbf{P} (\hat{\mathbf{x}}_{\mathbf{H}_p} - \mathbf{x}_s) \quad (14)$$

donde $\mathbf{Q} = \text{diag}(\mathbf{q})$, $\mathbf{R} = \text{diag}(\mathbf{r})$ y $\mathbf{P} = \text{diag}(\mathbf{p})$ son las correspondientes matrices de ponderación para el error de seguimiento de la trayectoria, la señal de control y el coste terminal, $\hat{\mathbf{x}}_e$ es el estado de predicción, $\hat{\mathbf{x}}_{\mathbf{H}_p} = \hat{\mathbf{x}}_e(H_p)$ es el estado final de predicción para el instante $(t + H_p)$, \mathbf{u}_e es la señal de control que debe ser calculada (la variación del ángulo de giro de las ruedas), \mathbf{w} es la referencia futura del sistema para el estado extendido y $\mathbf{x}_s = \mathbf{w}(H_p)$ es el punto de estabilidad que debe ser alcanzado.

La referencia futura del sistema para el estado extendido \mathbf{w} se debe calcular para cada instante de predicción del horizonte. Las referencias para la posición lateral y y para el ángulo yaw ψ se calculan como la diferencia entre el estado actual y la trayectoria real. Las referencias para la velocidad lateral \dot{y} , la velocidad yaw $\dot{\psi}$ y la acción de control correspondiente al ángulo de las ruedas $u_d = \delta$, son nulas para minimizar la variación de estas señales.

La ley de control del MPC se deriva de la optimización de la función de coste de Ecuación (14), que incluye el modelo de predicción. Así, es necesario minimizar la función de coste J para obtener los valores óptimos de las señales de control incrementales $\mathbf{u}_e^*(k) = \Delta \mathbf{u}^*$ que permiten al vehículo minimizar el error de seguimiento de trayectoria,

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_e^*(k) &= \min_{s.t.} J(\hat{\mathbf{x}}_e - \mathbf{w}, \mathbf{u}_e, \hat{\mathbf{x}}_{\mathbf{H}_p} - \mathbf{x}_s) \\ &\mathbf{u}_e(k) \in U_e \\ &\mathbf{x}_e(k) \in X_e \\ &\mathbf{x}_e(k + H_p) \in \Omega_{si} \end{aligned} \quad (15)$$

Nótese que se consideran restricciones para estado extendido $\mathbf{x}_e(k)$, la acción de control extendida $\mathbf{u}_e(k)$ y para el estado terminal $\mathbf{x}_e(k + H_p) \in \Omega_s$, para garantizar la convergencia del controlador.

Una vez calculada la secuencia de control óptima $\Delta \mathbf{u}^*$, sólo se aplica la primera, que se corresponde con el instante actual,

$$u(k) = \Delta u(k) + u(k-1) \quad (16)$$

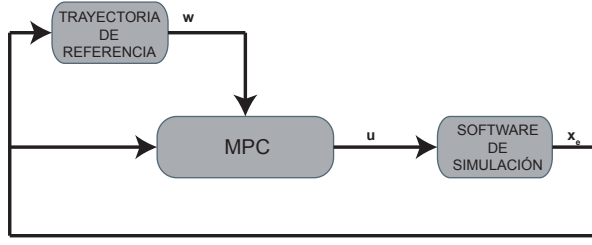


Figura 2: Diagrama del control MPC propuesto

Tabla 1: Parámetros del vehículo IPG Carmaker

Parameter	Value
m : masa del vehículo	1412 kg
l_F : distancia CoG - eje delantero	1.016 m
l_R : distancia CoG - eje trasero	1.564 m
I_z : inercia del ángulo de guiñada	1536.7 kg m ²
$c_{\alpha F}$: rigidez en curva eje delantero	956.08 N/rad
$c_{\alpha R}$: rigidez en curva eje trasero	956.08 N/rad

5. RESULTADOS

5.1. Configuración de la simulación

El objetivo de esta sección es validar el control MPC con estabilidad garantizada propuesto. El controlador trata de conducir el vehículo para que siga una referencia determinada a lo largo del tiempo de la forma más precisa posible. Dicha referencia es conocida y calculada para cada horizonte de predicción por el módulo correspondiente. Por último, la señal óptima calculada es empleada por el software de simulación para calcular la nueva posición y orientación del vehículo en su CoG (Figura 2).

Las simulaciones se han llevado a cabo mediante el software MATLAB/Simulink [11] y la dinámica del vehículo se ha simulado mediante el software de simulación Carmaker, de IPG Automotive [8]. El vehículo seleccionado es un utilitario y los parámetros principales del vehículo se recogen en la Tabla 1. Además, el software de simulación incluye un conductor virtual que conduce el vehículo considerando la trayectoria. Este conductor virtual se ha configurado para que alcance una aceleración longitudinal y lateral máxima de $0,3 g$ ($\approx 2,94 m/s^2$), que es el límite de una conducción confortable.

Las simulaciones se han llevado a cabo para un rango amplio de velocidades, desde los $30 km/h$ hasta los $120 km/h$. Se ha empleado un periodo de muestreo de $T_s = 1,5 s$, que para una velocidad de travesía de $30 km/h$ cubre $12,5 m$ y para una de $120 km/h$ $50 m$, y donde el horizonte de predicción es $H_p = 20$ y el horizonte de control $H_c = 10$. Las matrices de ponderación sintoniza-

das experimentalmente son $Q = I_4$ y $R = 100$.

Además, se han incluido restricciones físicas al controlador para garantizar el correcto funcionamiento del control lateral. En el vector de estados se consideran dos variables: el desplazamiento lateral y el ángulo de las ruedas o acción de control. El resto de variables del vector de estados no se han restringido. Las restricciones en el desplazamiento lateral vienen definidas por el error lateral máximo, que debe ser sintonizado para que el vehículo no se salga del carril. Así, considerando una carretera estándar de $3,5 m$ de ancho y un vehículo de $2 m$ de ancho, se establece un valor máximo de $0,6 m$.

$$-0,6 m \leq y(k) \leq 0,6 m \quad (17)$$

Por otro lado, el ángulo de giro de las ruedas se restringe por las limitaciones físicas del sistema de la dirección del vehículo,

$$-0,72 rad \leq u(k) \leq 0,72 rad \quad (18)$$

La restricción de la señal de la acción de control extendida se corresponde a la variación del ángulo de las ruedas y se ha sintonizado para garantizar el confort de los pasajeros,

$$-0,08 rad/T_s \leq \Delta u(k) \leq 0,08 rad/T_s \quad (19)$$

5.2. Conjuntos invariantes y estabilidad

En relación con la estabilidad del sistema y tal y como se detalla en la Sección 3, se calculan offline un grupo de conjuntos invariantes para varios rangos de velocidades, ya que el modelo LTV se define en función de esta variable.

El rango de velocidades que se quiere cubrir varía desde los $30 km/h$ hasta los $120 km/h$. Para cubrir todo este rango se definen 6 intervalos y cada intervalo considera un rango de $20 km/h$ habiendo un solape de $5 km/h$ entre dos intervalos consecutivos. Este solape se define para garantizar la estabilidad al cambiar de un intervalo a otro y el valor de $5 km/h$ se ha seleccionado ya que cubre la máxima variación de la velocidad permitida durante un periodo de muestreo T_s .

De esta forma, en cada iteración se analiza la velocidad del vehículo para ver a qué número de intervalo pertenece y se aplica el conjunto invariante correspondiente. En el caso de que la velocidad coincida con una zona de solape, se comprueba la aceleración longitudinal del vehículo. Si la aceleración es positiva, se escoge el intervalo superior, ya que se supone que la velocidad aumenta, y viceversa. Los intervalos se muestran en la Figura 3

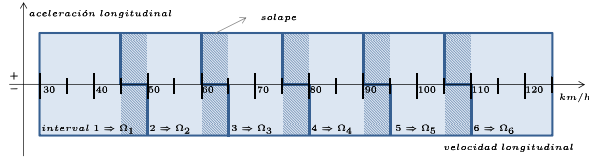
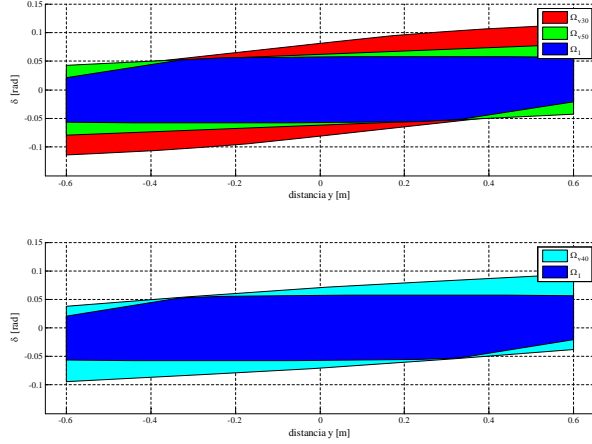


Figura 3: Intervalos seleccionados

Figura 4: Conjunto invariante resultante para el primer intervalo Ω_1 (arriba) y conjunto invariante resultante contenido dentro de un conjunto invariante intermedio Ω_{v40} (abajo)

Una vez definidos los intervalos, se calculan los conjuntos invariantes correspondientes a cada uno. Para cada intervalo, el correspondiente conjunto invariante se calcula como la intersección entre el conjunto invariante para el sistema con los valores límite del intervalo. Por ejemplo, tal y como se muestra en la Figura 4, el conjunto invariante para el primer intervalo Ω_1 se define como la intersección entre el conjunto invariante para el sistema con una velocidad de 30 km/h , Ω_{v30} , y el sistema con una velocidad de 50 km/h , Ω_{v50} ,

$$\Omega_1 = \Omega_{v30} \cap \Omega_{v50} \quad (20)$$

Además, este conjunto invariante resultante está contenido en cualquier conjunto invariante para un sistema con una velocidad perteneciente al intervalo considerado. Por ejemplo, el conjunto invariante para el primer intervalo está contenido dentro del conjunto invariante calculado para el sistema con una velocidad de 40 km/h , Ω_{v40} (Figura 4).

$$\Omega_1 \subset \Omega_{v40} \quad (21)$$

De esta forma, se garantiza la estabilidad del MPC propuesto tal y como se detalla en la Sección 3

5.3. Resultados de Simulación

Con el fin de validar el MPC propuesto se han planteado tres casos de estudio. El primer caso de estudio considera que el vehículo circula por unas curvas abiertas a altas velocidades sin exceder la aceleración lateral máxima de $0,3 \text{ g}$. Los resultados se muestran en la Figura 5 para diferentes velocidades. Como se puede observar, la trayectoria se sigue de forma correcta para todo el rango de velocidades con un error lateral máximo entre la trayectoria de referencia y la trayectoria seguida de $-0,04 \text{ m}$, lo cual es despreciable.

El segundo caso de estudio es similar al primero, pero en este caso se consideran unas curvas más cerradas. En la Figura 6 se puede observar cómo para poder hacer un correcto seguimiento de la trayectoria, la velocidad longitudinal del vehículo se reduce hasta $51,3 \text{ km/h}$. En este caso, el error lateral es ligeramente superior, dado que se trata de un trazado más exigente, pero se sigue manteniendo en un valor despreciable de $-0,05 \text{ m}$.

Por último, el controlador MPC se ha validado en un circuito con diferentes tipos de curvas, desde curvas cerradas o zig-zags hasta largas rectas. Los resultados se muestran en las Figuras 7 y 8 para una vuelta. En la Figura 7 se muestra el circuito, donde el punto representa el lugar de inicio de la vuelta y la flecha la dirección, junto con las tres variables restringidas: la acción de control, esto es, el ángulo de giro de las ruedas; la variación de la acción de control; y el error lateral. Las líneas de puntos negras representan los límites de cada variable. Como se puede observar, debido a las restricciones impuestas en la variación de la acción de control y en las matrices de ponderación seleccionadas, la acción de control varía de forma suave sin generar grandes giros. Además, el error lateral varía a lo largo del circuito manteniendo valores despreciables. Se ha resaltado el punto más crítico del circuito, que se corresponde al instante $t = 35 \text{ s}$, donde el vehículo circula por la curva más cerrada. En este punto, la variación de la acción de control alcanza los límites impuestos para tomar la curva, pero el error se mantiene dentro de los límites y la estabilidad del sistema está garantizada.

En la Figura 8 se muestran los perfiles de velocidad y aceleración y el intervalo aplicado. En cada instante, el sistema comprueba la velocidad longitudinal y la aceleración del vehículo para seleccionar el intervalo correspondiente. A continuación, se aplica el conjunto invariante calculado offline para dicho intervalo. Así, según crece la velocidad también lo hace el número del intervalo seleccionado y vice versa. Por ejemplo, cuando la velocidad longitudinal es de 113 km/h se aplica el conjun-

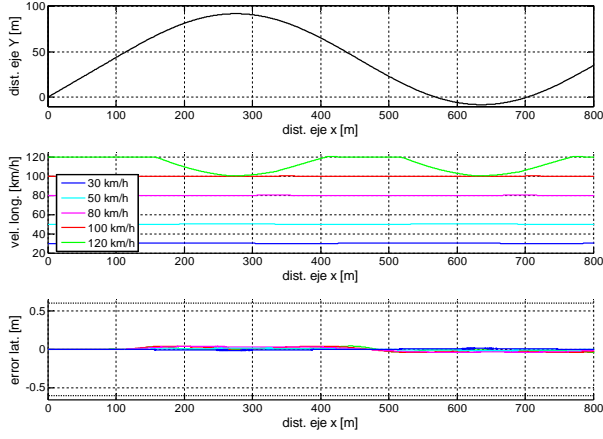


Figura 5: Simulación para dos curvas abiertas

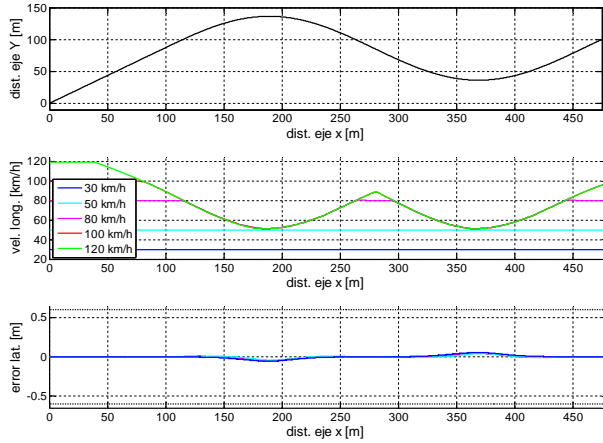


Figura 6: Simulación para dos curvas cerradas

to invariante correspondiente al intervalo 6, Ω_6 , que está definido para un rango de velocidades de $105 - 125 \text{ km/h}$.

Así, el MPC desarrollado es capaz de predecir la trayectoria a seguir por el vehículo y de restringir su movimiento lateral, con el fin de que el vehículo se mantenga en su carril cumpliendo las restricciones impuestas y condiciones de estabilidad. Estos resultados demuestran la efectividad de la propuesta.

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se propone un controlador de seguimiento de trayectoria mediante un MPC con un modelo de predicción LTV y estabilidad garantizada. El sistema propuesto optimiza tanto el desplazamiento lateral como el ángulo yaw , obteniendo así un mejor seguimiento de trayectoria. El modelo de predicción LTV de dos grados de libertad y dependiente de la velocidad longitudinal del vehículo aporta un mayor rango operacional que otras propuestas. A su vez, se implementan

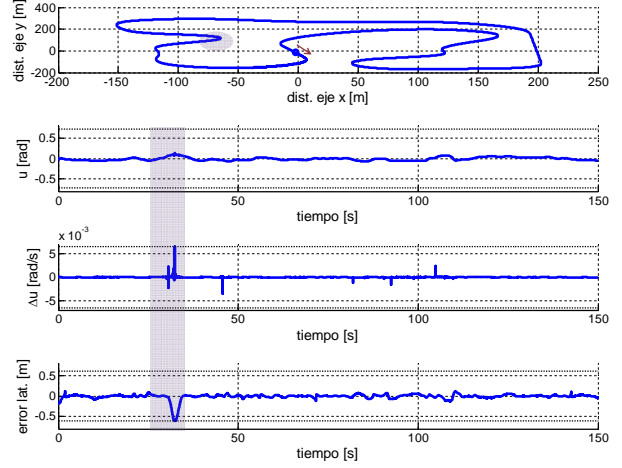


Figura 7: Simulación para una vuelta del circuito

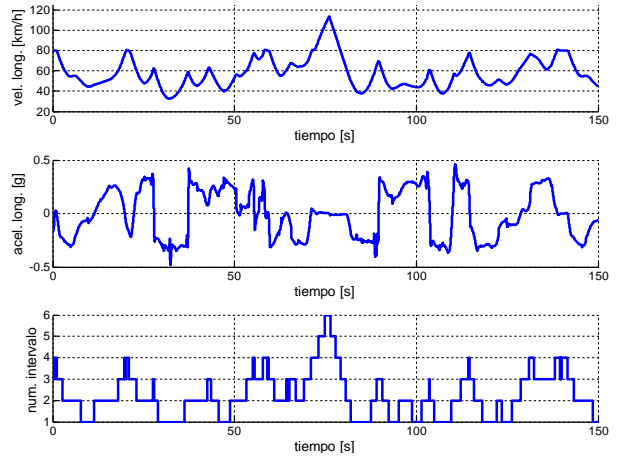


Figura 8: Variación del intervalo para una vuelta del circuito

requerimientos de confort al imponer restricciones en el ángulo de giro de las ruedas, así como en su variación, y al considerar la orientación en el MPC. Además, también se consideran restricciones en el error lateral para garantizar un correcto seguimiento de la trayectoria sin salirse de la calzada. Todo ello garantizando la estabilidad del sistema al aplicar un coste terminal y un conjunto invariante para la región terminal.

El control propuesto ha sido validado para un amplio rango de velocidades mediante tres casos de estudio. Los dos primeros casos de estudio validan el controlador mediante unas curvas abiertas a elevadas velocidades y unas más cerradas a menores velocidades. El MPC es capaz de dirigir el vehículo apropiadamente cumpliendo las restricciones limitantes y con un error despreciable. El tercer y último caso de estudio consiste en un circuito con diferentes tipos de trazado. El vehículo circula por el circuito a una velocidad variable desde los 33 km/h hasta los 113 km/h , con un error

lateral máximo de 0,6 m y cumpliendo las consideraciones de estabilidad.

Como futuro trabajo se plantea la incorporación de consideraciones de robustez a la aplicación, para la compensación de perturbaciones.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Programa Predoctoral de Formación de Personal Investigador No Doctor BFI- 2012- 223 del Gobierno Vasco, el proyecto IT914-16 del Gobierno Vasco y PPG17/56 de la UPV/EHU

Referencias

- [1] M. Bertozzi, A. Broggi, and A. Fascioli. Vision-based intelligent vehicles: State of the art and perspectives. *Robotics and Autonomous Systems*, 32(1):1 – 16, 2000.
- [2] F. Borrelli, P. Falcone, T. Keviczky, J. Asgari, and D. Hrovat. MPC-based approach to active steering for autonomous vehicle systems. *International Journal of Vehicle Autonomous Systems*, 3(2-4):265–291, 2005.
- [3] E. F. Camacho and C. Bordons. *Model predictive control in the process industry*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [4] B.-C. Chen, B.-C. Luan, and K. Lee. Design of lane keeping system using adaptive model predictive control. *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pages 922–926, 2014.
- [5] X. Du and K. K. Tan. Autonomous vehicle velocity and steering control through nonlinear model predictive control scheme. *IEEE Transportation Electrification Conference*, 2016.
- [6] R. Gonzalez, M. Fiacchini, T. Alamo, J. Guzman, and F. Rodriguez. Online robust tube-based mpc for time-varying systems: a practical approach. *International Journal of Control*, 84(6):1157–1170, June 2011.
- [7] A. E. Hajjaji and S. Bentalba. Fuzzy path tracking control for automatic steering of vehicles. *Robotics and Autonomous Systems*, 2003.
- [8] IPG Automotive. CarMaker. <http://ipg.de/>, June 2017.
- [9] G. Leen and D. Heffernan. Expanding automotive electronic systems. *Computer*, 35(1):88–93, 2002.
- [10] C. MacAdam, Z. Bareket, P. Fancher, and R. Ervin. Using neural networks to identify driving style and headway control behavior of drivers. *Vehicle System Dynamics*, 29(S1):143–160, 1998.
- [11] MathWorks. Matlab/Simulink. <http://es.mathworks.com/>, June 2017.
- [12] D. Mayne, J. Rawlings, C. Rao, and P. Scoekaert. Constrained model predictive control: Stability and optimality. *Automatica*, 36(6):789 – 814, 2000.
- [13] J. Naranjo, C. González, R. García, and T. D. Pedro. Lane-change fuzzy control in autonomous vehicles for the overtaking maneuver. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 9(3):438–450, Sept 2008.
- [14] J. E. Naranjo, C. Gonzalez, R. Garcia, T. de Pedro, and R. E. Haber. Power-steering control architecture for automatic driving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 6(4):406–415, Dec 2005.
- [15] H. Pacejka. *Tire and Vehicle Dynamics*. Butterworth-Heinemann, 2012.
- [16] G. V. Raffo, G. K. Gomes, J. E. Normey-Rico, C. R. Kelber, and L. B. Becker. A predictive controller for autonomous vehicle path tracking. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 10(1):92–102, 2009.
- [17] R. Rajamani. *Vehicle Dynamics and Control*. Springer, 2012.
- [18] Z. Sun, G. Bebis, and R. Miller. On-road vehicle detection: A review. *IEEE Transactions on Patter*, 28(5):694–711, May 2006.
- [19] V. Turri, A. Carvalho, H. E. Tseng, K. H. Johansson, and F. Borrelli. Linear model predictive control for lane keeping and obstacle avoidance on low curvature roads. *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 378–383, 2013.
- [20] P. Zhao, J. Chen, T. Mei, and H. Liang. Dynamic motion planning for autonomous vehicle in unknown environments. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pages 284–289, 2011.

Implementación y evaluación de controladores basados en eventos en la norma IEC-61499

Oscar Miguel-Escrig, Julio-Ariel Romero-Pérez, Esteban Querol-Dolz
Departamento de Ingeniería de Sistema Industriales y Diseño
Universidad Jaume I
omiguel@uji.es, romeroj@uji.es, estebanqueroldolz@gmail.com

Resumen

En este artículo se presenta un estudio sobre el desempeño de controladores PID basados en eventos implementados según el estándar de programación IEC-61499. En el trabajo se abordan los detalles de la implementación y se presentan resultados experimentales que demuestran las ventajas de este tipo de algoritmos respecto a los controladores basados en tiempo, fundamentalmente en cuanto a la reducción del coste computacional sin afectar de forma significativa al comportamiento del lazo de control.

Palabras clave: PID, control basado en eventos, tiempo real, IEC-61499

1. INTRODUCCIÓN

En la última década se han realizado numerosas investigaciones sobre el control basados en eventos (CBE) de sistemas continuos. A diferencia de los controladores basados en tiempo usados tradicionalmente, en los que la ejecución del algoritmo de control se realiza a un periodo constante, en los controladores basados en eventos el algoritmo de control se ejecuta sólo tras la ocurrencia de eventos asíncronos que indican cambios significativos en el estado del sistema; un ejemplo típico es el cruce de niveles por parte de la señal de error (diferencia entre la referencia o set-point y la salida controlada), [3].

A la par de los avances teóricos en el CBE, durante los últimos años se ha estado desarrollando un nuevo estándar para la programación de sistemas de automatización y control distribuidos, conocido como IEC-61499 [9]. Dicho estándar introduce conceptos novedosos respecto a su predecesor, el IEC-61131 [6], el cual es ampliamente usado en la actualidad en la programación de Autómatas Programables; como por ejemplo la forma de ejecución, mientras que el antiguo está basado en ciclos de SCAN y el nuevo basado en el uso y manejo de eventos, y que además contiene características que favorecen su uso en el diseño de aplicaciones distribuidas y reconfigurables.

En este trabajo se realiza un estudio sobre la implementación y el desempeño de algoritmos de CBE usando el estándar IEC-61499. Esto permitirá introducir en el IEC-61499 estrategias de control de sistemas continuos más acorde con las características del propio estándar (control de ejecución por eventos), en sustitución de los controladores basados en tiempo (con ejecución periódica) que se han venido usando hasta ahora. En el estudio sobre el desempeño de los controladores se tendrán en cuenta tanto los aspectos de coste computacional como del comportamiento del sistema de control.

Dado que los controladores PID son los más utilizados en aplicaciones industriales, y que actualmente existen varios trabajos en los que se proponen distintas versiones de PID basados en eventos, hemos considerado conveniente realizar el estudio sobre la implementación y el comportamiento de este tipo de controladores bajo el IEC-61499.

2. BREVE DESCRIPCIÓN DE LA NORMA IEC-61499

En el centro de la norma se encuentra el modelo de bloques de funciones (Function Block Model - FBM), donde un bloque de funciones (Function Block - FB) es una unidad funcional de software, con su propia estructura de datos que puede ser manipulada por uno o más algoritmos que dotan al FB de su funcionalidad. Un FB define un *tipo* a partir del cual se pueden crear una o varias instancias del FB.

En los FBs confluyen dos tipos de parámetros, los datos y los eventos, los cuales regulan la ejecución del bloque. Un FB puede tanto recibir como enviar estos tipos de parámetros y asociarlos de manera que la recepción o envío de un evento se corresponda con el refresco de los datos de entrada o salida asociados. Los FBs encapsulan una funcionalidad concreta, lo que puede dar lugar a que estos FBs contengan variables internas, cuyo tipo y tratamiento vienen regulados por las características del FB. Como en la norma IEC-61499 no se permite el uso de variables globales para la aplicación, los algoritmos que definen la funcionalidad del FB, sólo tendrán acceso a las entradas,

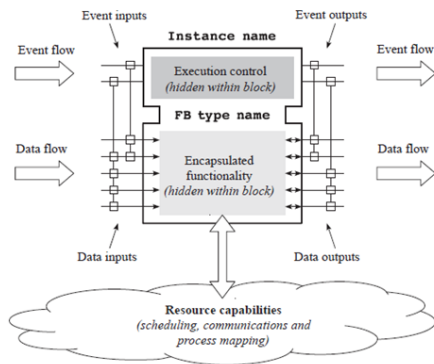


Figura 1: Estructura de un FB. [9]

las salidas y a las variables internas, siendo todos ellos datos retenidos entre llamadas al FB.

En la figura 1 se muestran los elementos anteriormente descritos de un FB. En la parte superior se representa el *control de ejecución* (Execution control) que gestiona la entrada y salida de eventos. En la parte inferior se representa la *funcionalidad* del FB, formada por los algoritmos encargados de procesar los datos de entrada. Cuando ocurre un evento de entrada, se actualizan los datos de entrada asociados al evento y se ejecutan los algoritmos vinculados al mismo. La asociación de eventos y datos se representa mediante las líneas verticales que aparecen en la entrada y salida del FB y que unen eventos y datos mediante pequeños cuadrados. Como resultados de la ejecución de los algoritmos se generan los eventos y datos de salida.

Los BFB se caracterizan por tener una estructura y comportamiento que están definidas como respuesta a la recepción de eventos entrantes. Internamente, esto se materializa en un gráfico de control de ejecución (Execution Control Chart - ECC), cuyas transiciones pueden estar reguladas por la recepción de dichos eventos o por las variables que se tratan durante su ejecución.

Los FBs se agrupan en un modelo que configura una aplicación de la norma IEC-61499 (Application Model - AM). Una aplicación está definida por las diferentes instancias de FB que la componen (pudiendo haber múltiples instancias de un mismo tipo de bloques) y por la interconexión de los mismos. Como la funcionalidad total del programa queda definida completamente en función de los FBs, no se necesita de variables globales o locales fuera de los mismos.

3. CONTROLADORES PID BASADOS EN EVENTOS

Una de las primeras contribuciones al desarrollo de los controladores PID basados en eventos fue

introducida por Årzen en [1] como una forma de reducir el uso de la CPU de los sistemas de control basados en computador sin afectar de forma significativa el comportamiento del bucle de control. En su artículo, Årzen puso de relieve algunas de las consideraciones más importantes que se debía tener en cuenta en los controladores PID basados en eventos. Entre éstas se pueden destacar los errores que se producen en los cálculos de los términos integral y derivativo cuando el tiempo entre muestras se incrementa. Varios trabajos posteriores estuvieron dirigidos a resolver los problemas revelados por Årzen, fundamentalmente el relacionado con el error en el cálculo de error del término integral. Deben ser destacados en este sentido los trabajos publicados por Durand [4, 5] y Vasyutynskyy [7, 8].

En concreto, el algoritmo de Årzen plantea una llamada periódica al controlador no siéndolo así la ejecución del cálculo. Årzen propone una lógica de detección de eventos basada, por una parte, en que la diferencia de errores entre la última ejecución y la llamada actual supere un umbral y por otra parte impone una condición basada en el tiempo máximo que el controlador puede estar sin ejecutarse.

Además, y a diferencia del controlador PID basado en ciclos de SCAN, el cual pre-calcula algunos coeficientes, en el algoritmo de Årzen se deben recalcular cada vez ya que dependen del tiempo entre ejecuciones. Por todo ello el código resultante queda de la forma siguiente:

```
e = ysp - y;
% calcula acción de control
hact = hact + hnom;
if abs(e - e_old) > elim || hact > hmax
    %coeficientes del pid discreto
    ad=Td/(N*hact+Td);
    bd=K*Td*N/(Td+N*hact);
    bi=K*hact/Ti;
    %algoritmo de control PID discreto
    up= K*(b*ysp - y);
    ud=ad*ud + bd*(c*(ysp-ysp_old)-(y-y_old));
    ui=ui+bi*(ysp - y);
    u=up + ui + ud;
    if (u<u_sat_min)
        u=u_sat_min;
        if (ysp-y<0)
            ui=ui-bi*(ysp - y);
        end
    end
    if (u>u_sat_max)
        u=u_sat_max;
        if (ysp-y>0)
            ui=ui-bi*(ysp - y);
        end
    end
    y_old=y;
    ysp_old=ysp;
    hact = 0;
    event=1;
```



```
end
u_out = u;
```

4. IMPLEMENTACIÓN DE CBE EN LA NORMA IEC-61499

El desarrollo de controladores con la norma IEC-61499 se lleva a cabo mediante la implementación de nuevos bloques de funciones, ya que estos constituyen la unidad básica de programación. En este estudio, vamos a implementar y comparar un controlador basado en un tiempo clásico, con período constante, con el controlador basado en eventos de Årzen, desarrollado en [1].

Para la implementación y evaluación de comportamiento de los controladores hemos utilizado el software 4DIAC, un entorno de desarrollo *open-source*, basado en el entorno de desarrollo Eclipse. Una alternativa de software más enfocada al ámbito industrial sería la utilización del software NxtOne, el cual también es capaz de desarrollar aplicaciones en la norma IEC-61499 y además soporta hardware de diferentes fabricantes industriales como BECKHOFF, WAGO o SIEMENS.

4DIAC permite la creación de bloques, sistemas, aplicaciones y el resto de modelos. Las aplicaciones desarrolladas en 4DIAC son interpretadas por el runtime FORTE que debe estar ejecutándose en el dispositivo de control. Este runtime puede descargarse de la página del proyecto 4DIAC.

La Figura 2 muestra la estructura externa de dos controladores. A la izquierda tenemos el controlador periódico y a la derecha el controlador de Årzen. Al tratarse en este caso de BFB (Basic Function Block), su estructura interna, y su comportamiento está caracterizada por un ECC (Execution Control Chart). El ECC para el controlador periódico se muestra en la figura 3, y es compuesto por tres estados (INIT, RST y REQ) donde se ejecutan dos algoritmos (RESET y REQ) y cuyas transiciones se pasan si se reciben los eventos REQ, RST o INIT y se sale siempre de los estados. En algunos estados (INIT y en REQ), se pueden enviar eventos de salida, como lo son CNF en el caso de REQ y INITO en el caso de INIT. El algoritmo RESET es una puesta a cero de valores (término derivativo, integral y anterior medida), mientras que el algoritmo REQ realiza el cálculo del controlador PID.

El ECC del controlador de Årzen es más complejo, Figura 4. En este caso, se mantienen tanto las partes de inicialización y de reset del controlador pero en cuanto a la ejecución, una vez se recibe el evento REQ, se pasa al estado *Check.point* donde se procede a evaluar el tiempo que ha pasado entre

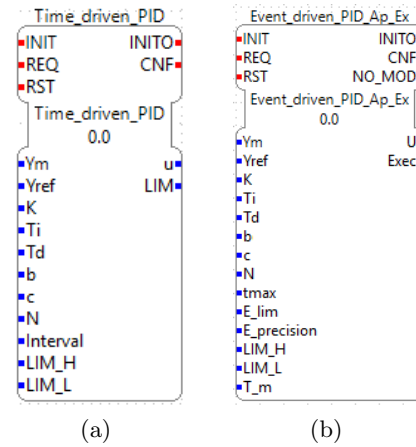


Figura 2: Bloques de funciones de los PID periódico (a) y basado en eventos (b).

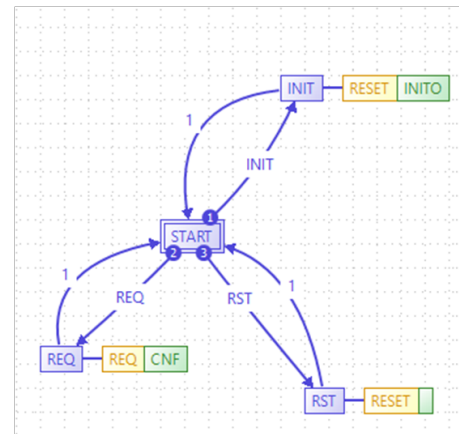


Figura 3: ECC del controlador PID basado en tiempo de muestreo.

la última ejecución y el momento actual mediante el algoritmo *Check.time*. Una vez efectuado este cálculo se comprueban las transiciones, que son las condiciones que impone Årzen para la ejecución de su controlador (la función *abs* devuelve un entero, por eso es necesario añadir algunas cifras significativas con la parámetro en entrada *E_precision*). En el caso de no tener que ejecutarse simplemente se entra en el estado *SENDNOMOD* y se envía el evento *NO_MOD*. En caso contrario, se ejecuta el algoritmo *Req*, donde se realiza el cálculo de la nueva acción de control.

Finalmente, se modela una aplicación donde se incluyen diferentes bloques para la correcta ejecución del algoritmo de control. Se incluyen los bloques *XENO_RT_E_CYCLE* para llamar regularmente a la cadena de FBs, el bloque *BB-Bio_AIn* que proporciona la entrada medida, *F_RT_CLOCK_NS* que proporciona el tiempo del procesador para efectuar cálculos dentro del controlador y un bloque adicional para actualizar la

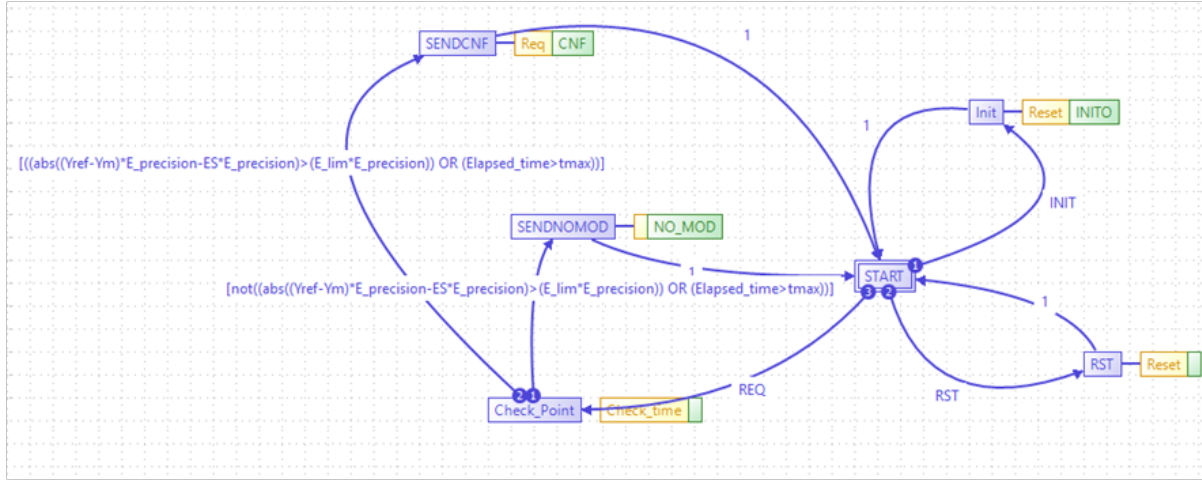


Figura 4: ECC del controlador PID basado en eventos propuesto por Árzen [1].

salida PWM BBBio_PWM, como se muestra en la Figura 5.

La ejecución de la aplicación se desarrolla en dos fases. En una primera fase de inicialización se envía un evento a la entrada INIT del bloque Cycle desde el recurso que contiene esta aplicación. Una vez inicializado este FB se inicia toda la cadena hasta llegar a la salida PWM, siendo este último bloque el que da comienzo a la fase de ejecución con el evento entrante en el START del FB Cycle, iniciando así el envío periódico de eventos y el control del sistema ejecutando o no el controlador.

5. MODELADO DE TIEMPOS DE EJECUCIÓN

Como se ha comentado anteriormente, uno de los objetivos de este trabajo es la evaluación de los controladores basados en eventos desarrollados según el estándar IEC-61499. En dicha evaluación abordaremos tanto el comportamiento del sistema de control en lo relativo a su respuesta, y al coste computacional de este tipo de controladores. La comparación se realizará con un controlador periódico.

En primer lugar, podemos caracterizar el tiempo de realizar Q ejecuciones del controlador periódico como la suma del tiempo que consume cada uno de los FBs que forman su cadena de ejecución por medio de la ecuación (1):

$$t_{PIDtb} = Q(t_{AIN} + t_{PID} + t_{PWM}) \quad (1)$$

donde t_{AIN} es el tiempo de ejecución del bloque de lectura de entrada analógica (BBBio_AIN), t_{PID} es el tiempo de ejecución del bloque PID y t_{PWM} es tiempo de ejecución del bloque de escritura en la salida analógica (BBBio_PWM).

En el caso del PID basado en eventos, dicha ecuación

debe tener en cuenta el porcentaje de generación de eventos, que llamaremos η , o sea, cuando la condición para el cálculo de una nueva acción de control es verdadera y por tanto el algoritmo de control se ejecuta completamente. El tiempo de ejecución es descrito por la ecuación (2) obtenida de la modelización presentada en la figura 5. En este caso t_{PID_e} es el tiempo que consume el bloque PID cuando se tiene que calcular una nueva acción de control, $t_{PID_{ne}}$ es el tiempo consumido por el bloque PID cuando no se tiene que calcular un nuevo valor de acción de control y t_{CLK} es el tiempo que consume el bloque F_RT_CLOCK_NS encargado de la obtención del tiempo del procesador.

$$t_{PIDeb} = Q(\eta(t_{AIN} + t_{PID_e} + t_{PWM} + t_{CLK}) + (1 - \eta)(t_{AIN} + t_{PID_{ne}} + t_{CLK})) \quad (2)$$

Usando las ecuaciones (1) y (2) podemos calcular el porcentaje de tiempo necesario por el controlador basado en eventos respecto del controlador periódico, en función del porcentaje de generación de eventos (η). Dicha relación vendrá dada por el siguiente cociente:

$$\frac{t_{PIDeb}}{t_{PIDtb}} = \frac{Q(\eta(t_{AIN} + t_{PID_e} + t_{PWM} + t_{CLK}))}{t_{AIN} + t_{PID} + t_{PWM}} + \frac{(1 - \eta)(t_{AIN} + t_{PID_{ne}} + t_{CLK})}{t_{AIN} + t_{PID} + t_{PWM}} \quad (3)$$

Si definimos $\gamma = \frac{t_{PIDeb}}{t_{PIDtb}}$ y operamos sobre la ecuación anterior, obtenemos que la relación entre γ y η viene dada por la ecuación (4), que se corresponde a la ecuación de una recta cuyos parámetros dependen de los tiempos de ejecución de cada uno de los bloques implicados en el modelo de la apli-

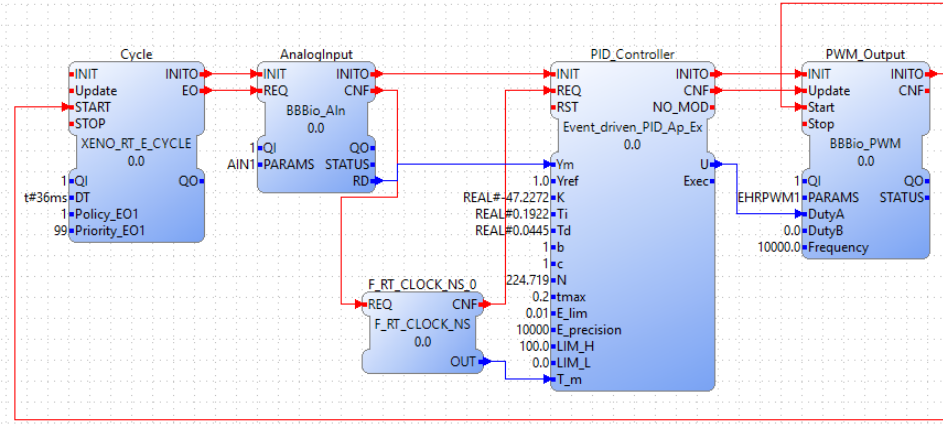


Figura 5: Estructura de la aplicación de control PID basado en eventos según IEC-61499, desarrollada en 4DIAC.

cación.

$$\gamma = \eta \frac{t_{PID_e} - t_{PID_{ne}} + t_{PWM}}{t_{AIN} + t_{PID} + t_{PWM}} + \frac{t_{PID_{ne}} + t_{AIN} + t_{CLK}}{t_{AIN} + t_{PID} + t_{PWM}} \quad (4)$$

A partir de la ecuación anterior podemos llegar a interesantes conclusiones sobre el tiempo consumido por un controlador basado en eventos respecto del controlador periódico en función del porcentaje de ejecución del primero. Por ejemplo, evaluando la ecuación 4 para $\gamma = 1$, obtenemos el porcentaje de generación de eventos η para el cual el controlador basado en eventos tiene el mismo tiempo de ejecución medio que el controlador periódico. Dicho valor vendría dado por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{t_{PID} - t_{PID_{ne}} + t_{PWM} - t_{CLK}}{t_{PID_e} - t_{PID_{ne}} + t_{PWM}} \quad (5)$$

Si evaluamos la ecuación 4 para $\eta = 0$, obtenemos el tiempo medio consumido por el CBE respecto del controlador periódico para un porcentaje de generación de eventos igual a cero. Dicha condición se corresponde con el funcionamiento del controlador en estado estable, si no se genera evento alguno. La ecuación sería la siguiente:

$$\gamma = \frac{t_{PID_{ne}} + t_{AIN} + t_{CLK}}{t_{AIN} + t_{PID} + t_{PWM}} \quad (6)$$

Finalmente, si evaluamos la ecuación (4) para $\eta = 1$, se obtiene el tiempo medio consumido por el controlador basado en eventos respecto del controlador periódico para un 100% de generación de eventos. Dicho comportamiento se corresponde con el comportamiento del controlador en estado transitorio, cuando se produce un cambio en la referencia o aparece una perturbación de valor significativo.

Los resultados obtenidos con estas ecuaciones para la plataforma de experimentación usada en este estudio serán presentadas en la siguiente sección.

6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.1. Plataforma de experimentación

La plataforma experimental para la evaluación del comportamiento de los controladores basados en eventos está formada por una tarjeta BeagleBone Black (BBB). Dicha tarjeta cuenta con varias entradas analógicas y salidas PWM que la hacen idónea para realizar nuestros experimentos, a diferencia de otras alternativas que también fueron valoradas como la tarjeta Raspberry Pi.

Con el objetivo de tener una plataforma experimental lo más simple y versátil posible, se optó por definir los sistemas a controlar mediante circuitos electrónicos cuya dinámica viene determinada por los componentes pasivos que lo forman. En concreto se trata de un filtro paso-bajo de segundo orden con una estructura de Rauch, cuyo esquema se muestra en la Figura 6, con función de transferencia definida por sus componentes de acuerdo con la ecuación (7).

$$H(s) = -\frac{1}{R^2 C_1 C_2} \frac{1}{s^2 + \frac{3}{RC_2} s + \frac{1}{R^2 C_1 C_2}} \quad (7)$$

Cuatro de estos circuitos fueron incluidos en una tarjeta electrónica que se puede acoplar directamente sobre la BBB en forma de capa, como se muestra en la Figura 7. Los componentes que definen la dinámica de los circuitos se pueden cambiar fácilmente, por lo que resulta muy sencillo tener sistemas con diferentes dinámicas.

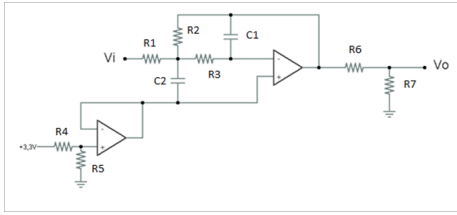


Figura 6: Circuito electrónico que emula un sistema a controlar.

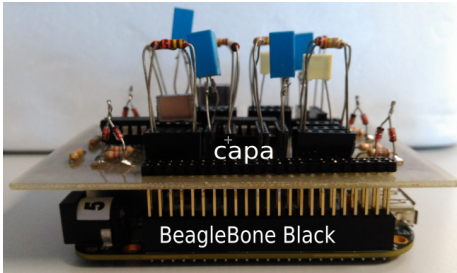


Figura 7: Conjunto BeagleBone Black y capa con circuitos a controlar.

Para programar la tarjeta BBB y hacer los experimentos, la conectamos a un ordenador y mediante una conexión SSH accedemos al directorio donde se encuentra el runtime FORTE (con los bloques que queremos probar compilados) y lo ejecutamos. Acto seguido, descargamos la aplicación desde el ordenador a la BBB con el programa 4DIAC y comienza su ejecución automáticamente.

6.1.1. Sistema de tiempo real: Xenomai

Las tarjetas BBB traen instalado por defecto un sistema operativo Linux que no permite ejecutar aplicaciones en tiempo real. Esto supone un problema ya que la ejecución de cada nuevo FB se realiza cada 5 ms independientemente de los tiempos de ejecución de cada uno. Para mejorar las prestaciones de la BBB se ha instalado en ella Xenomai. Esto nos proporciona una gestión de la aplicación en tiempo real y permite reducir de forma significativa los tiempos de respuesta de la tarjeta.

6.2. Resultados y discusión

6.2.1. Tiempos de ejecución

Para poder aplicar la ecuación (4) a nuestras aplicaciones de control periódico y basado en eventos al ejecutarse en la BBB se han realizado mediciones de los tiempos de ejecución medio de cada uno de los FB que intervienen en ellas. Para ello hemos medido con un osciloscopio el tiempo entre la activación de una salida digital de la BBB que tiene lugar al inicio de la ejecución del FB y la desactivación de la misma salida digital que tiene lugar al final de la ejecución del FB en estudio. Con el

objetivo de corregir la medición realizada de esta forma con el tiempo requerido de activación y desactivación de una salida digital, se hizo un test preliminar en que hemos activado una salida digital para acto seguido desactivarla. El tiempo obtenido ha sido de entorno a los $4 \mu s$. Este valor se restó a los tiempos medidos para cada uno de los FB. Los resultados arrojados por el estudio se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Resultados experimentales de tiempos de ejecución medios.

Tiempos	Valor (μs)
t_{AIN}	8
t_{PWM}	12.7
t_{PID}	8.5
t_{PID_e}	10.5
$t_{PID_{ne}}$	5.5
t_{CLK}	2

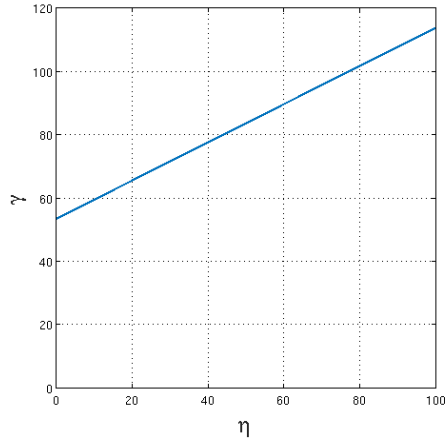
Usando los datos de la tabla 1 en la ecuación 4, obtenemos la recta mostrada en la figura 8, de la cual podemos extraer como resultados importantes los siguientes:

- El tiempo de ejecución medio del controlador basado en eventos es igual al requerido por el controlador periódico si el porcentaje de generación de eventos del primero es del 77.12 %.
- Si la tasa de generación de eventos es del 100 % entonces el tiempo de ejecución medio del controlador basado en eventos sobrepasa al tiempo de ejecución del controlador periódico en un 13.8 % de su valor.
- Por último, si no se generan eventos, entonces el tiempo de ejecución medio del controlador basado en eventos es el 53.45 % del tiempo de ejecución del controlador periódico.

Respecto a este último punto, debemos tener en cuenta que para el controlador propuesto por Årzén no existe una tasa de generación de eventos igual a cero ya que el algoritmo fija un tiempo máximo (h_{max}) que si es sobrepasado se genera un evento. Si se considera que el tiempo de ejecución del algoritmo es h_{nom} , entonces la tasa de generación de eventos para una secuencia de eventos por superación de tiempo máximo será h_{nom}/h_{max} . Esta sería la tasa de generación mínima que puede alcanzar del algoritmo de Årzén.

6.2.2. Comportamiento del sistema

Para el estudio del comportamiento del sistema de control se consideró un circuito como el mos-

Figura 8: Relación entre η y γ .

trado en la figura 6 con función de transferencia dada por la ecuación 8, la cual se obtiene con los siguientes valores de los componentes: $C1=270nF$, $C2=1\mu F$, $R1=R2=R3=330k\Omega$, $R4=R5=1k\Omega$, $R6=1.5k\Omega$ y $R7=1.8k\Omega$.

$$G(s) = \frac{0,612}{s^2 + 9s + 34} \quad (8)$$

El ajuste de los parámetros del controlador PID se realizó mediante el método AMIGO presentado en [2]. Para el diseño se ha usado un valor máximo de la función de sensibilidad $M_s=1.4$ y un coeficiente de filtro de la derivada $N=10$. Los parámetros obtenidos son los siguientes: $K_c=47.2$, $T_i=0.19$, $T_d=0.044$. Estos parámetros fueron usados tanto para el controlador periódico como para el basado en eventos. El periodo de muestreo en ambos casos se fijó en $h_{nom}=36ms$ y los valores de ponderación de la referencia y de la derivada de la referencia se consideraron $b=1$ y $c=1$. Además los valores de saturación mínimo y máximo de la acción de control: $LIM_H=5$ y $LIM_L=0$. Para el controlador basado en eventos se consideró umbral de cruce $E_{lim}=0.01$ y un tiempo máximo de ejecución sin eventos $h_{max}=5h_{nom}$.

La Figura 9 muestra las respuestas obtenidas con el controlador periódico y el CBE propuesto por Árzén ante tres cambios en la referencia en $t = 15$, 20 y 25 segundos. Se puede observar que la respuesta del PID periódico es similar en los tres cambios de referencias, mientras que el CBE tiene diferencias significativas en el tercer cambio respecto a los dos primeros. Esto es consecuencia de que en el CBE la respuesta está muy influenciada por la casuística de generación de los eventos. Se puede notar, además, que la acción de control del CBE tiene cambios más bruscos que la del controlador periódico. Esto se debe al efecto de la acción integral, según se indicó por Durand y sus

Tabla 2: Índices IAE y TV de la respuesta del sistema real con ambos controladores.

Índice	Experimento	Periódico	Árzén
IAE	15sec	0.103	0.0948
	20sec	0.1035	0.0969
	25sec	0.1031	0.0792
TV	15sec	0.6378	0.6431
	20sec	0.6106	0.6747
	25sec	0.6264	0.5323

colaboradores en [5]. Con el objetivo de cuantificar las diferencias entre ambas respuestas se ha calculado el índice IAE de la salida y el TV de la acción de control para cada controlador. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 2, donde se puede apreciar que no existen diferencias significativas entre ambos controladores. Los resultados confirman la variabilidad en las respuestas del CBE respecto del controlador periódico: para el tercer cambio de referencia los valores obtenidos para el CBE son diferentes respecto a los resultados para $t = 15$ y $t = 20$ segundos.

En la zona de estado estable se puede apreciar como el controlador basado en eventos se ejecuta por tiempo máximo cada $5h_{nom}$, lo cual quiere decir una tasa de generación de eventos $\eta = h_{nom}/h_{max} = 1/5 = 20\%$. Para este valor de η se obtiene de la gráfica de la Figura 8 que tiempo medio de ejecución medio del controlador de Árzén es el 66 % del tiempo medio de ejecución del controlador periódico. Por el contrario, cuando se produce un cambio en la referencia el controlador basado en eventos se ejecuta todos los instantes de muestreo, o sea que la tasa de generación de eventos es $\eta = 100\%$ y en ese caso el controlador de Árzén requiere para su ejecución el tiempo del controlador periódico incrementado en un 13.8 % de su valor, como indica el valor de γ en la Figura 4. Durante la respuesta transitoria la tasa de generación de evento η varía, y en consecuencia lo hace γ .

7. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado la implementación de controladores basados en eventos según el estándar IEC-61499 para la programación de sistema de control distribuidos. Además se ha realizado un estudio donde se ha tenido en cuenta tanto los aspectos relativos al coste computacional de los algoritmos como la respuesta del sistema de control.

En cuanto al coste computacional se ha obtenido un modelo que permite comparar de una forma sistemática los controladores basados en eventos con los periódicos. Dicho modelo relaciona la tasa de generación de eventos de un controlador basado en

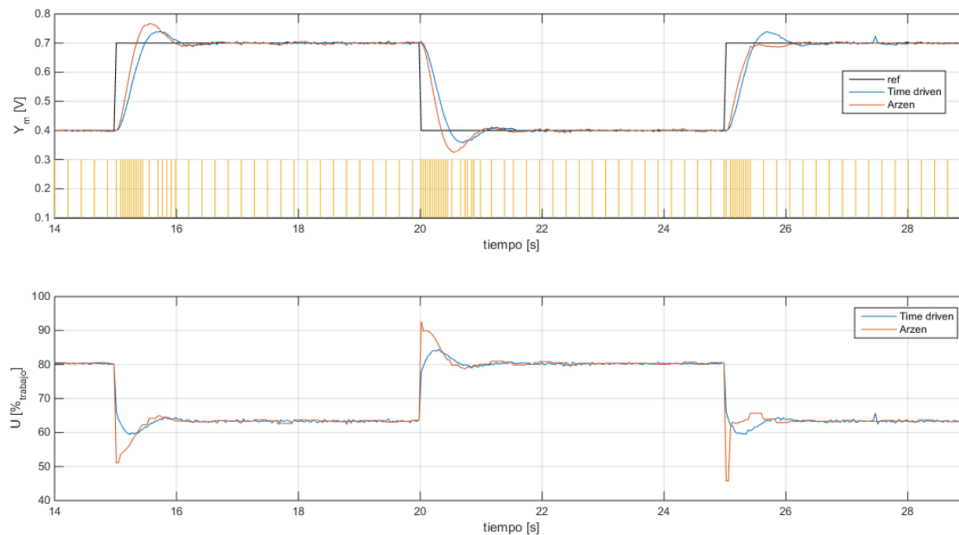


Figura 9: Respuesta del sistema (superior) y acción de control (inferior) a cambios en referencia controlado con un PID periódico y el PID basado en eventos propuesto por Årzén. Las líneas verticales amarillas en la gráfica superior representan los eventos generados por el controlador de Årzén.

eventos con el porcentaje de tiempo de ejecución de un controlador periódico usado por el algoritmo basado en tiempo. El modelo permite conocer el ahorro en tiempo de ejecución que se obtiene para una tasa de generación de eventos baja, o el sobre coste en tiempo de ejecución para tasa de generación de eventos altas, tomando como referencia el tiempo de ejecución del controlador periódico.

Se ha demostrado de forma experimental la viabilidad del estándar IEC-6499 para la implementación de algoritmos de control basados en eventos. Para ello se ha desarrollado una plataforma que permite realizar experimentos considerando sistemas con diferentes características de respuesta dinámica.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado mediante fondos de los proyectos TEC2015-69155-R del MICINN y P1·1B2015-42 de la Univesitat Jaume I.

Referencias

- [1] Karl-Erik Årzén. A simple event-based pid controller. In *Proc. 14th IFAC World Congress*, volume 18, pages 423–428, 1999.
- [2] K.J. Åström and T. Hägglund. Revisiting the Ziegler–Nichols step response method for PID control. *Journal of Process Control*, 14(6):635–650, sep 2004.
- [3] Sebastián Dormido, J Sánchez, and Ernesto Kofman. Muestreo, control y comunicación basados en eventos. *Revista Iberoamericana*

de Automática e Informática Industrial RIAI, 5(1):5–26, 2008.

- [4] Sylvain Durand and Nicolas Marchand. An event-based pid controller with low computational cost. In *8th International Conference on Sampling Theory and Applications (SampTA'09)*, pages Special-session, 2009.
- [5] Sylvain Durand and Nicolas Marchand. Further results on event-based pid controller. In *Control Conference (ECC), 2009 European*, pages 1979–1984. IEEE, 2009.
- [6] Karl-Heinz John and Michael Tiegelskamp. *IEC 61131-3: programming industrial automation systems: concepts and programming languages, requirements for programming systems, decision-making aids*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [7] Volodymyr Vasyutynskyy and Klaus Kabitzsch. Time constraints in pid controls with send-on-delta. *IFAC Proceedings Volumes*, 42(3):48–55, 2009.
- [8] Volodymyr Vasyutynskyy and Klaus Kabitzsch. A comparative study of pid control algorithms adapted to send-on-delta sampling. In *Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on*, pages 3373–3379. IEEE, 2010.
- [9] Alois Zotl and Robert Lewis. *Modelling control systems using IEC 61499*, volume 95. IET, 2014.

AUTOMATIZACIÓN Y MONITORIZACIÓN DE UNA INSTALACIÓN DE ENSAYO DE MOTORES

Miguel Ochoa Vega

AVL Ibérica S.A. Departamento de Ingeniería eléctrica y automática.

Paseo Arco de Ladrillo 68, planta 5ª, Valladolid, 47007, España. {miguel.ochoa@avl.com}

Eduardo Julio Moya de la Torre, Fco. Javier García Ruiz, Alfonso Valentín Poncela Méndez

Instituto de las Tecnologías Avanzadas de la Producción, ITAP.

Escuela de Ingenierías Industriales, Paseo del Cauce 59, Valladolid, 47011, España. {poncela@eii.uva.es}

Resumen

El objetivo del presente artículo es el de presentar la automatización y monitorizado (local y remoto) de las instalaciones (facilites) de un edificio de celdas de ensayo para probar motores de tractor en Turquía. El edificio de celdas de ensayo tiene la peculiaridad de haber sido prefabricado en contenedores en Austria y trasladado hasta su ubicación final.

Las tareas aquí presentadas describen los diferentes componentes del sistema de control (PLC's), los interface hombre máquina (HMI's), los medios para acceso remoto, y las comunicaciones entre dispositivos. Se trata de una instalación real, estable y en funcionamiento.

Palabras Clave: contenedor banco de ensayo, ensayo de motores, automatización, monitorizado, comunicaciones industriales, PLC, SCADA, HMI, VPN, acceso remoto.

1 INTRODUCCIÓN

El trabajo, a nivel industrial, queda enmarcado en el campo de la industria de automoción. Concretamente dentro del desarrollo y pruebas de motores para maquinaria agrícola, tractores para cultivo. En esta industria, los requisitos de plazo del mercado son cada vez más demandantes. Nos encontramos con que los tiempos de desarrollo de un vehículo se han visto disminuidos drásticamente y las previsiones de futuros son aún más exigentes, como se puede ver en la Figura 1.

El tiempo de desarrollo a principios de 2012 era de unos 42 meses. Las previsiones [1] muestran que en 2020 este tiempo será de únicamente 20 meses. Si nos centramos en el mercado de maquinaria agrícola, al requerimiento de plazo se debe sumar el aumento de la demanda de maquinaria. La producción de cereal ha aumentado en un 40% desde principios de

este siglo [2].

50% REDUCTION OF DEVELOP LEAD-TIME UNTIL 2020

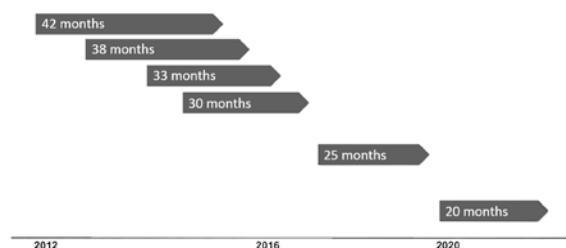


Figura 1: Previsiones desarrollo automóvil. SAE. Morey, 2014

Queda claro que hay que probar más vehículos y hay que probarlos en menos tiempo. A mayores, el cómo hay que probarlos también juega en esta ecuación. Las pruebas más limitantes a día de hoy son las de emisiones contaminantes. Las normativas EURO, conocidas en el ámbito de aplicación de los turismos, tienen su equivalente en la norma “Reglamento (UE) 2016/1628 del Parlamento Europeo y del Consejo del 14 de septiembre 2016 [4]. Véase la Tabla 1 sobre los requisitos relativos a los límites de emisiones de gases y partículas contaminantes y a la homologación de tipo para los motores de combustión interna que se instalan en las máquinas móviles no de carretera.

Tabla 1: Límites de emisiones maquinaria

Fase de emisiones	Subcategoría motor	Potencia kW	CO g/kWh	HC g/kWh	NOx g/kWh	PM g/kWh	PN #/kWh	A
Fase V	IWA-V-1 IWA-C-1	19<P<75	5	HC+CO<4,7	0,3	---	---	6
Fase V	IWA-V-2 IWA-C-2	75<P<130	5	HC+NOx<5,4	0,14	---	---	6

Las condiciones de contorno de nuestro problema, podrían enunciarse según esta frase: El mercado necesita más bancos de ensayo, para pruebas de emisiones en un menor plazo. La respuesta de AVL [3] -primera empresa a nivel mundial en bancos de ensayos de motores- es “fabricar” de forma modular el edificio de ensayos por completo, en vez de

“construirlo” en casa del cliente. Un banco de ensayos de motor (véase Figura 2), consiste en una sala cerrada, aislada acústica y térmicamente dentro de la cual se prueba un motor de combustión. El motor se acopla al dinamómetro, que simula el par resistente. Para fijarlo al suelo, se tiene una bancada de acero. Puesto que el motor se encuentra desnudo, todos sus auxiliares – radiador, circuito de aceite, bomba combustible- han de ser simulados mediante equipos de acondicionamiento. La sala cuenta con una ventilación, para eliminar el calor del motor y una toma de aire fresco y otra de escape de humos. Estas salas tienen diferentes propósitos, según lo que se requiera ensayar. Uno de los más comunes, son ensayos de emisiones de gases contaminantes.

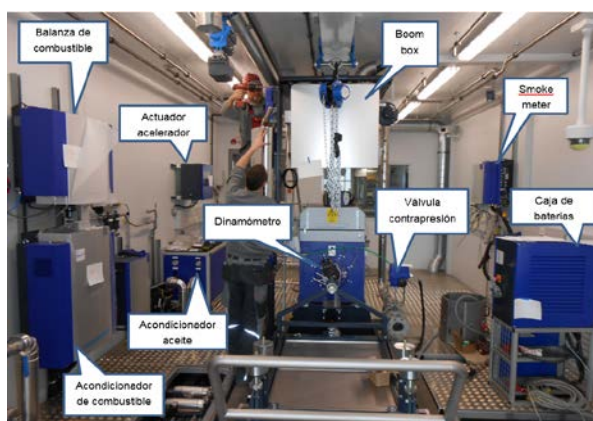


Figura 2: Vista general sala de ensayo

De todas las disciplinas que intervienen en este proyecto (obra civil, mecánica, electricidad...) el presente artículo se centra en las ramas relacionadas con la automatización.

La automatización, como pieza clave de la ingeniería de bancos de ensayo en contenedor, ha de cumplir con los plazos y calidades requeridas por el cliente

Del enunciado anterior se extraen los siguientes objetivos, de los que se ha partido en este artículo.

- Programación de PLCs. Desarrollo de código y depuración de un total de 5 PLCs de la gama S7-1200 de Siemens. Desarrollo de maniobras de funcionamiento, alarmas, parámetros de mantenimiento y controladores PID.
- Programación de sistema SCADA: Desarrollo gráfico y de interface de un total de 3 sistemas SCADAs para la visualización, registro de datos, alarmas, eventos y tareas de mantenimiento. La herramienta para este desarrollo ha sido el software AVL TFControl [3]. A mayores, para uno de los PLCs de la instalación, por tratarse de una máquina standard, se desarrollará un sistema HMI dedicado, basado en servidor web embebido en su PLC.

- Implementación de comunicaciones industriales. Programación de comunicaciones Profibus DP con sistema Maestro AVL PUMA [3]. Programación de comunicaciones S7 entre diferentes PLCs de la instalación, incluidos PLCs propios y de terceros. Se estandarizará la estructura de programación, para reducir plazos y costes.
- Puesta en marcha de la instalación: recepción de armarios eléctricos en taller. Pre puesta en marcha de las instalaciones en Austria y puesta en marcha final en Ankara, Turquía. Generación de certificados de prueba y protocolos de aceptación por el cliente.
- Solución de acceso remoto fiable y estándar dentro de la empresa: Estudio de mercado sobre las distintas soluciones de acceso remoto a PLCs. Comparativa entre solución de desarrollo propio y comercial. Implementación de software de acceso remoto basado en tecnología VPN

Para la presentación de los trabajos llevados a cabo en la consecución de los objetivos precedentes, el presente artículo se ha estructurado de la siguiente manera: en la sección 2 se hace una descripción de la instalación, presenta un layout de la instalación, así como los principales componentes que son directamente controlados por el sistema de automatización y o tienen interface con él; en la sección 3 se explican en las tareas de automatización los diferentes pasos realizados para automatizar la instalación descrita en el capítulo anterior. Esta sección a su vez se divide en varias subsecciones, según las diferentes disciplinas implicadas en el proyecto como son el desarrollo PLC, desarrollo SCADA y acceso remoto. En la sección 4 se presentan las conclusiones extraídas y se finaliza el trabajo con la lista de referencias utilizadas y citadas.

2 DESCRIPCIÓN LA INSTALACION

El edificio de ensayos (Figura 3) está construido dentro del recinto de la fábrica, como un edificio independiente. Se sitúa junta a la campa de acopio de unidades fabricadas. El proyecto completo, consiste en el suministro e instalación de los siguientes componentes:

- Edificio principal. Celdas de ensayo
- Contenedor de servicios. Grupos de bombeo, depósitos de inercia y compresor
- Enfriadora para producir agua fría a 2-7°C
- Transformadores y armarios de distribución.

Los dos edificios cuyas instalaciones tenemos que automatizar son el edificio de ensayos (Figura 4) y el contenedor de servicios (Figura 5)

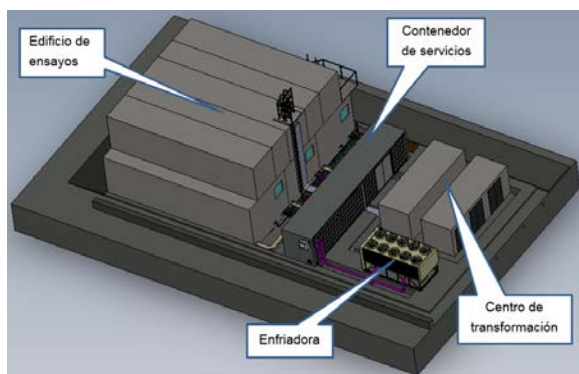


Figura 3: Vista general de la instalación

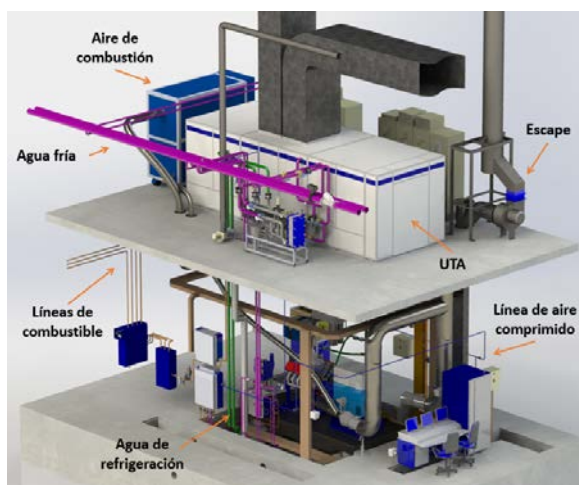


Figura 4: Edificio principal. Celda1.

La Figura 4 muestra los componentes del banco de ensayo y sus instalaciones asociadas. El edificio principal consta de dos celdas de ensayo. Las celdas se sitúan en la planta baja, y las instalaciones necesarias para cada una de ellas en la planta superior. En la planta superior se encuentran las unidades de ventilación, los equipos de aire de admisión y los extractores de escape. El edificio principal cuenta con dos salas de ensayo, separadas por una sala de equipos de emisiones y otra de almacenamiento de botellas de gases. En el edificio principal también se encuentran las salas de control.



Figura 5: Contenedor de servicios

El contenedor de servicios, mostrado en la Figura 5 se encarga de proveer los diferentes fluidos y energías primarias al edificio principal.

- Agua 7/12°C
- Agua 25°C
- Combustible
- Aire comprimido.

Se tiene un circuito de agua helada que envía agua a 7/12°C al edificio principal. Los consumidores de esta agua en el edificio principal son las unidades de ventilación y aire de admisión, los acondicionadores de combustible y los equipos de refrigeración de intercooler. El principio de funcionamiento del sistema es el siguiente: Cuando el sistema se enciende, las bombas de velocidad constante arrancan inmediatamente, enviando el agua hacia la planta enfriadora. Después de la enfriadora, nos encontramos con los tanques de inercia, donde el agua se almacena para aumentar la disponibilidad del sistema y se reducen las posibles fluctuaciones de temperatura. Puesto que puede que no todos los consumidores de agua estén demandando a la vez, el grupo de bombeo variable, ajusta su velocidad utilizando un controlador PID en función de la presión diferencial entre el punto de impulsión y retorno hacia las celdas.

Del mismo modo, se tiene un circuito de agua fría a ~25°C. El principio de funcionamiento del sistema es similar al anterior. La generación de frío se realiza mediante un intercambiador de calor contra el circuito de agua helada. La temperatura de salida de este intercambiador se controla realizando un PID contra una válvula de 3 vías situada en el primario del intercambiador, en el circuito de agua helada. La bomba en esta aplicación es de velocidad constante y la regulación de caudal se realiza utilizando una válvula reguladora de presión en impulsión. La regulación es puramente mecánica, no interviene el sistema de automatización. El principal consumidor de este circuito es el propio motor que se está probando en la celda de ensayo.

El contenedor de servicios también es responsable del suministro de combustible a las celdas. Para mantener constante la presión a la entrada de los equipos de medida y acondicionamiento de combustibles, el combustible es bombeado a unos depósitos de 60 litros – uno para cada tipo de combustible- situados en la terraza del edificio principal. Estos pequeños depósitos de combustible se conocen como jornaleros. El funcionamiento del sistema es sencillo. En cada una de las celdas, el utilizador puede seleccionar combustible del tipo 1 o de tipo 2. Esto abre la válvula de solenoide del combustible correspondiente. El nivel del tanque está monitorizado por un sensor de flotador. En el momento que se detecta nivel bajo, la válvula de

entrada se abre hasta que el nivel vuelve a ser alto. Existe una alarma por nivel demasiado alto, que cierra automáticamente la entrada de combustible. En el caso del combustible de los barriles, el relleno del tanque es manual. El operador ha de activar una bomba para poder volver a llenar el tanque superior. En cuanto al aire comprimido, se trata de una red de 6bar. Los únicos elementos de supervisión o control que tiene el sistema de automatización en este circuito, son una electroválvula de corte y un presostato. La válvula de corte cerrará cuando se produzca algún evento de seguridad en el interior de la celda (paro de emergencia, incendio...)

3 TAREAS DE AUTOMATIZACIÓN

Una vez entendida la instalación se ha realizado una selección de sensores – de manera conjunta con los diseñadores de fluidos- para controlar el proceso. Se han empleado sensores para la medida de temperaturas TN2531 [5]. Los sensores de presión utilizados son PN2024 [6] en el caso de medidas continuas, y PK5524 [7] en el caso de presostatos. Se han empleado detectores de flujo modelo SI6800 [8] y detectores de nivel KG8008 [9]. Los detectores de nivel empleados para combustibles, han de ser intrínsecamente seguros. Por ello se ha recurrido al modelo KSB KUEBLER 1003 [10]. En cuanto a los actuadores, las válvulas todo o nada son Genebre modelo 5528 [11], y las proporcionales son Sauter modelo AVM234S [12]. Los variadores de velocidad empleados para el control de bombas son Siemens Sinamics G120C. Una vez seleccionados los sensores y conectados a los armarios de control, se dispone de la lista entradas y salidas, punto de partida para las tareas de automatización y desarrollo HMI. Se han programado los elementos de la Tabla 2

Tabla 2: elementos de automatización.

Elemento	Descripción
LVDC00	PLC contenedor de servicios
LVDC01	PLC control celda 1
LVDC02	PLC control celda 2
LVDC03	PLC control sala emisiones
SCADA00	SCADA monitorización servicios
SCADA01	SCADA monitorización celda 1
SCADA02	SCADA monitorización celda 2

3.1 DESARROLLO PLC

La solución de automatización se ha realizado empleando PLCs Siemens S7-1200. Se ha situado un PLC dentro de cada uno de los armarios eléctricos,

en cada uno de los contenedores según Figura 6 y Figura 7. Disponer de un PLC en cada uno de los contenedores, nos permite probarlos por separado antes de la instalación final.

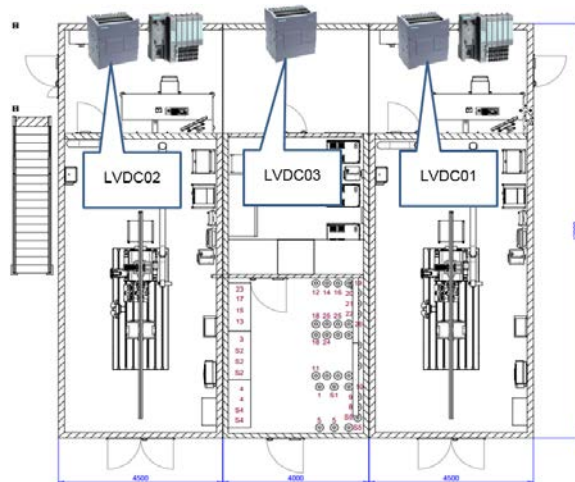


Figura 6: Posición de PLCs. Edificio principal.

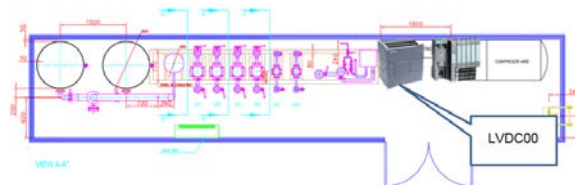


Figura 7: Posición de PLCs. Contenedor de servicios

Los PLCs se nombran de la misma manera que el armario eléctrico que los contiene. Las tareas que realizan los PLCs del edificio principal, son la vigilancia de elementos de los propios armarios eléctricos, como los auxiliares de automáticos, guardamotores y contactores. Del mismo modo, controla los principales servicios de la celda, como la unidad de ventilación, válvulas de acometida, enchufes y tomas pilotas. El PLC del contenedor de servicios realiza todas las funciones anteriores y a mayores es el encargado de la regulación de los circuitos de agua fría y agua helada.

La Figura 8 muestra el sinóptico de proceso del control de temperatura del agua fría y sobre él el flujo de información hacia y desde el controlador PID. La variable que se pretende controlar, es la temperatura de impulsión del agua fría. Para ello, el valor medido por el PID es la sonda de temperatura que se encuentra en la aspiración de las bombas. El valor que se pretende conseguir en esa sonda es de aproximadamente 30°C. Para ello, se cuenta con una válvula de control de tres vías. Esta válvula, está instalada en configuración mezcladora, a la salida del intercambiador de calor, balancea el caudal de agua helada que trasiega por el primario del intercambiador de calor.

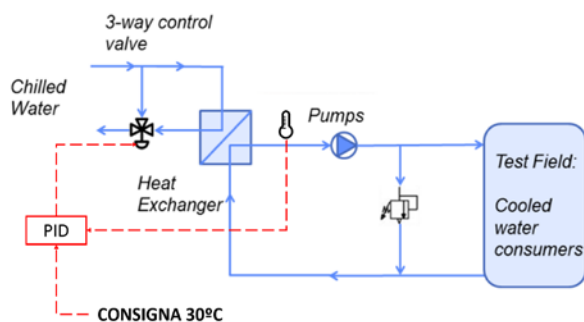


Figura 8: Esquema circuito agua fría

De este modo se controla la potencia transmitida por el intercambiador de calor y por consiguiente la temperatura del agua a su salida. La precisión de la temperatura que se quiere conseguir en este control no es muy demandante. Un control de $\pm 5^\circ\text{C}$ suele considerarse aceptable, ya que el principal consumidor de este tipo de agua es la refrigeración del bloque motor. Este control no se realiza directamente utilizando el agua de este circuito, si no que existe un equipo de acondicionamiento que cuenta con un intercambiador de calor que es el encargado de conseguir una precisión de regulación mayor en el circuito del motor a ensayar.

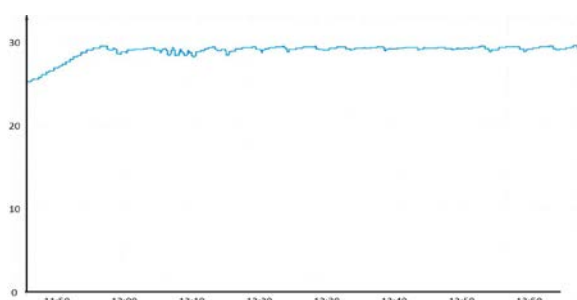


Figura 9: Control temperatura de agua fría

La Figura 9 muestra el gráfico de aceptación por parte del cliente final de la regulación del control de temperatura. Tanto la potencia de refrigeración como su control de temperatura son adecuados para el proceso. La oscilación que se observa durante los primeros ciclos tras el arranque no es un problema. Parece que puede ser debida al agua acumulado en el tramo de bypass de la instalación tras el primer arranque. En el momento que todo el agua empieza a circular y las temperaturas en los distintos puntos se estabilizan, la actuación de la válvula se estabiliza y el control de temperatura también.

La Figura 10 muestra el sinóptico de proceso del control de presión de agua helada y sobre él el flujo de información hacia y desde el controlador PID. La variable que se pretende controlar, es la diferencia de presión de impulsión y retorno del agua helada. Para ello, el valor medido por el PID es la resta de los valores medidos por los sensores de presión de impulsión y retorno.

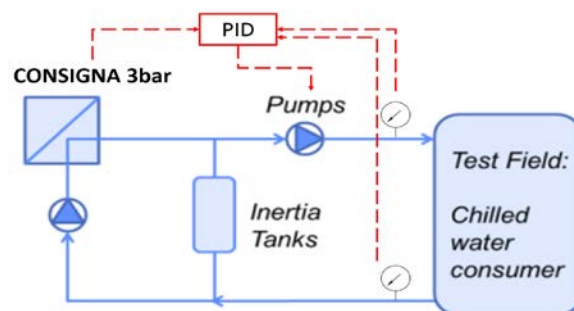


Figura 10: Esquema circuito agua helada

El valor que se pretende conseguir en esa diferencia de medidas es de 3 bar. Para ello, se cuenta con dos bombas, cuyos motores están comandados por sendos variadores de frecuencia. Conforme se abren los diferentes consumidores de agua helada en el lado de las celdas, la resistencia hidráulica del circuito disminuye. El caudal que han de enviar las bombas hacia el proceso es mayor, para satisfacer la demanda de los nuevos consumidores. Para mantener el caudal que requiere cada uno de estos consumidores, es necesario ajustar la presión de red. Para aumentar la presión, se aumenta la velocidad de giro de las bombas mediante variadores de velocidad.

El requerimiento de precisión en este control es mayor que en el control de temperatura. Los consumidores de este circuito están diseñados asumiendo una determinada presión de red. En el caso de que la presión de red salga del rango esperado, estos consumidores (acondicionador, de combustible, intercooler, ventilación...) dispararán alarmas y no funcionarán. No existe un valor requerido por el cliente. Se asumirá como valor límite, una diferencia de presión de ± 0.2 bar.

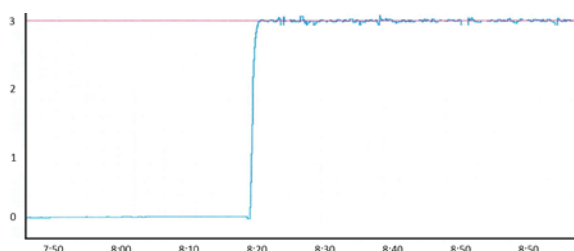


Figura 11: Control presión de agua helada

La Figura 11 muestra el gráfico de aceptación por parte del cliente final de la regulación del control de presión. Puesto que el control de presión es un control intermedio – la magnitud que tienen que controlar los acondicionadores es la temperatura – es fundamental que este control cumpla dos requisitos básicos: ha de ser más rápido en orden de magnitud que el control de temperatura (si las constantes de tiempo fuesen similares, ambos controladores se podrían acoplar); también ha de ser más preciso. Una oscilación en el control de presión, variará el flujo a

través de los intercambiadores de calor, ocasionando oscilaciones en el control de temperatura.

Una vez descritas las funciones de cada uno de los PLCs por separado, la Figura 12 lo ilustra.

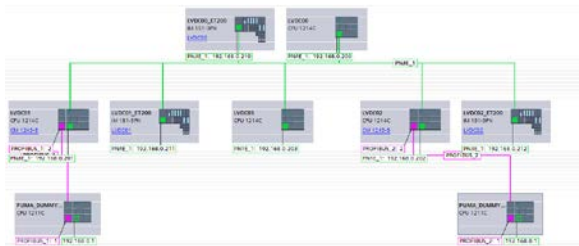


Figura 12: Estructura de red

Los PLCs de celda comunican con el PC industrial AVL Puma a través del protocolo Profibus DP, actuando como esclavos Profibus. Para ello se emplea el módulo CM1242-5 de Siemens. Del mismo modo, cada uno de los PLCs de celda, comunica con la ventilación de la celda correspondiente utilizando el protocolo S7, basado en Ethernet. Los PLCs de la ventilación son S7-300 y han sido programados por un tercero. Cada uno de los PLCs de celda comunica con el PLC del contenedor de servicios mediante otra comunicación S7.

3.2 DESARROLLO SCADA

Se ha desarrollado un sistema SCADA para el control de las instalaciones, tanto a nivel de celda como a nivel de contenedor de servicios. En cuanto al hardware, se han instalado 3 PCs físicos, formato all-in-one. Uno para cada celda de ensayo y otro para el contenedor de servicios. A nivel software, la herramienta empleada es el software AVL TFControl [3].

Es un sistema SCADA desarrollado por AVL, enfocado a instalaciones de ensayos de motores. El desarrollo y parametrización de las pantallas de la instalación se desarrolla en Adobe Flash ®. El SCADA AVL TFControl [3], tiene una interfaz gráfica interactiva, en la que se muestra el sinóptico del proceso y los botones para interactuar con él. Del mismo modo, cuenta con una base de datos MySQL en la que se almacenan un log de las diferentes variables del proceso. Estas variables se pueden graficar utilizando la herramienta RRDD tools. En la BBDD también se guardan tablas de alarmas, y eventos, con los diferentes mensajes de alarma y error que producen los PLCs.

El SCADA AVL TFControl también cuenta con un sistema de control de usuarios, que permite configurar el grado de acceso de cada uno de los usuarios registrados. Se tiene también un sistema de alarmas remotas, que permite enviar mensajes SMS o

de correo electrónico configurables. Las pantallas que componen el SCADA de cada una de las celdas se pueden ver en las Figuras 13 a 17.

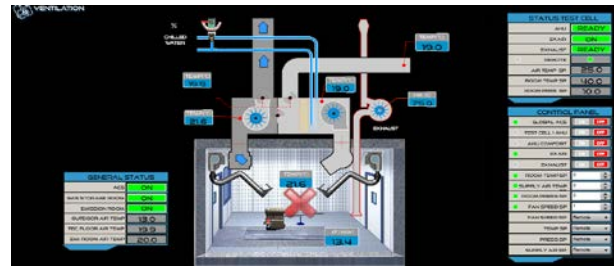


Figura 13: SCADA celda. Ventilación

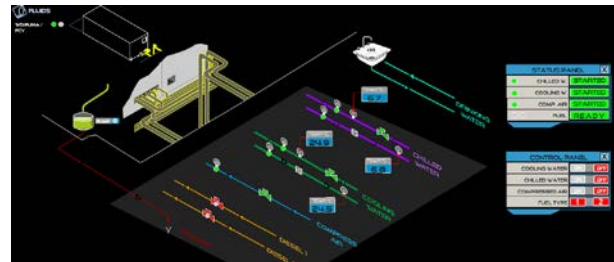


Figura 14: SCADA celda: Fluidos



Figura 15: SCADA servicios. Principal

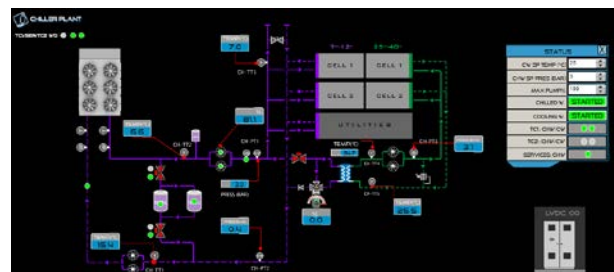


Figura 16: SCADA servicios. Agua fría y helada.

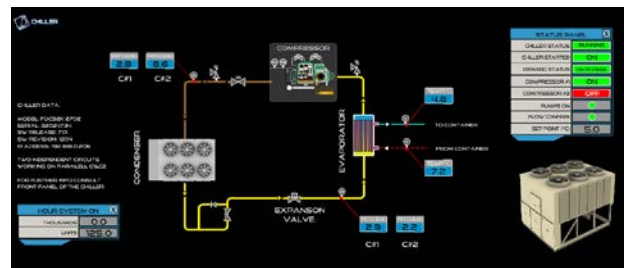


Figura 17: SCADA servicios. Enfriadora

Para el equipo AVL Battbox, situado en la celda de ensayo, se ha realizado a mayores un HMI basado en HTML, Figura 18, utilizando la funcionalidad de servidor web que tienen embebida los PLCs S7-1200.



Figura 18: HMI basado en HTML

Estos HMIs se programan introduciendo un código desarrollado en el encabezamiento de la página web. Dicho código, que tiene la apariencia de un comentario HTML, es interpretado por el servidor web del PLC, sustituyendo los valores codificados por valores de variables del PLC, enlazando así la memoria del PLC con la visualización en un navegador.

3.3 ACCESO REMOTO

A día de hoy internet es un elemento común en las aplicaciones de automatización industrial. Ya sea para recopilar datos de funcionamiento de las instalaciones, para el aviso de alarmas por mail o para tele asistencia, el número de instalaciones que incorporan un acceso a internet es cada vez mayor.

La tecnología elegida para realizar el acceso remoto es la red **VPN**. Una red VPN (virtual private network) es una extensión de una red de área local a través de otra red intermedia, como puede ser internet. La utilización de redes VPN es habitual en el campo de la informática, para soluciones de teletrabajo o interconexión entre varias oficinas de una misma empresa. Existen varios tipos de redes VPN, como pueden ser PSEC o PPTP. Nos vamos a centrar en el protocolo Open VPN, por ser de código abierto y contar con abundante documentación.

La arquitectura de red es relativamente sencilla. Se establece un servidor VPN, que está a la escucha esperando recibir conexiones por parte de los clientes. A nivel de seguridad, cada uno de los clientes, que conoce la dirección del servidor, le envía una petición de conexión. Para que un cliente se pueda conectar a este servidor, ambos tienen que conocer la clave precompartida de hasta 256bit y un certificado, que ha generado el servidor previamente para cada uno de los clientes. Estos certificados tienen una validez de 10 años en el servidor y han de guardarse en ambos dispositivos, cliente y servidor.

A nivel de enrutamiento, una vez que cada cliente y servidor cuenta con las condiciones de seguridad necesarias, se deben crear los adaptadores de red VPN. La realización práctica del túnel VPN consiste en la creación de un adaptador de red (igual que nuestra antena wifi o el conector de Ethernet) virtual

llamado driver tap. En el servidor, se realizará una ruta que redireccione el tráfico recibido por los adaptadores virtuales.

Se necesita definir a nivel hardware y software cada uno de los siguientes componentes.

Cliente OVPN en el lado PLC: ha de ser un dispositivo pequeño, que se pueda instalar dentro de un armario eléctrico. Ha de tener varias posibilidades de conexión a internet (utilizando tarjeta sim, wifi o una conexión Ethernet). Ha de ser sencillo de configurar y económico.

Cliente OVPN en el lado del usuario: lo más común es un PC con Windows, donde se tenga instalado TIA Portal [13] y el SCADA de la instalación. Se necesita un interface sencillo para elegir la instalación con la que nos queremos conectar. Control de usuarios y acceso por contraseña.

Servidor OVPN: ha de ser accesible desde cualquier lugar del mundo (ip fija) tiene que tener alta disponibilidad y baja tasa de fallos. No debe requerir un gran esfuerzo de mantenimiento a nivel software. Parece claro que la mejor opción para el servidor OVPN es un ordenador “en la nube” frente a un servidor propio. De esta manera el servicio, la velocidad y la disponibilidad mundial están garantizados. Para el cliente en el lado PLC, se barajó la posibilidad –incluso se ha llegado a implementar con éxito- utilizar el PLC del SCADA como cliente VPN y enrutar todo el tráfico de la LAN a su través. Esta opción se descartó, ya que el ordenador del SCADA es un PC que puede estar apagado, por ejemplo por ser la causa de la avería. No parecía la mejor opción para implementar el cliente VPN

La siguiente opción considerada, fueron los routers de altas prestaciones y low cost de la marca Mikrotik®. Estos routers son 100% configurables. Tienen implementado un sistema operativo basado en Linux llamado routerboard y nos permiten montar en un dispositivo que cabe en la palma de la mano un servidor web, un firewall, un cliente VPN... Esta opción cumple todas las condiciones que habíamos enumerado, salvo la sencillez. La configuración de este tipo de routers exige un perfil de usuario informático avanzado. La idea es que el router VPN, entre otras tareas, ayude a los técnicos de puesta en marcha, no que les sea un problema añadido. Aunque esta solución también era funcional, no se llegó a implementar por ser demasiado compleja.

La solución elegida finalmente (Figura 19) fue la proporcionada por el fabricante de routers industriales Ewon®, que provee una solución incluyendo los dos clientes VPN y aloja el servidor VPN en la nube.



Figura 19: Arquitectura del acceso remoto

4 CONCLUSIONES

Tras la finalización del presente trabajo, se pueden extraer las siguientes conclusiones.

- Se ha desarrollado el código de un total de 5 PLCs de la gama S7-1200 de Siemens. Se han programado las maniobras de funcionamiento, alarmas, parámetros de mantenimiento y controladores PID. Se han implementado las comunicaciones industriales utilizando buses de campo entre los diferentes PLCs así como el ordenador industrial AVL Puma.
- Se ha programado un sistema SCADA realizando el desarrollo gráfico y de interface de un total de 3 sistemas SCADAs para la visualización, registro de datos, alarmas, eventos y tareas de mantenimiento. La herramienta para este desarrollo ha sido el software AVL TFControl. Se han comprado e instalado 3 terminales de acceso a este SCADA, basados en ordenadores táctiles. A mayores, para uno de los PLCs de la instalación, por tratarse de una máquina standard, se desarrolló un sistema HMI dedicado, basado en servidor web embebido en su PLC.
- Se ha hecho la puesta en marcha de la instalación recepcionando los armarios eléctricos en taller, haciendo prepuesta marcha en Austria, y finalizando con la puesta en marcha final en Ankara, Turquía, generando los certificados de prueba y protocolos de aceptación por el cliente.
- Se ha realizado una solución de acceso remoto fiable y estándar dentro de la empresa junto con el estudio de mercado sobre las distintas soluciones de acceso remoto a PLCs y comparativa entre solución de desarrollo propio y comercial. Implementando el software de acceso remoto basado en tecnología VPN.
- Se ha establecido un estándar en la forma de programación dado que se tiene un número importante de PLCs a programar, y que los mismos han de ser editados por diferentes programadores y técnicos de puesta en marcha. Para ello se han desarrollado unas directrices y normas de programación que fueron aplicadas en el presente proyecto de tal suerte que todos los PLCs se han programado siguiendo estas normas

de programación, que han acabado convirtiéndose en el estándar de programación de AVL.

Referencias

- [1] B. Morey, «Volvo's Rapid Strategy aims at 20-month vehicle development,» SAE, 2015.
- [2] EARTH POLICY INSTITUTE, «Grain harvest,» Earth policy institute, 24 Mayo 2017. [En línea]. Available: http://www.earth-policy.org/indicators/C54/grain_2013. (Último acceso: 05 Mayo 2017).
- [3] AVL, «AVL,» AVL, <https://www.avl.com/home> (Último acceso: 24 Mayo 2017).
- [4] «REGLAMENTO (UE) 2016/1628 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO del 14 de septiembre 2016,» <https://www.boe.es/doue/2016/252/L00053-00117.pdf>. (Último acceso: 14 septiembre 2016).
- [5] IFM, «IFM -TN2531,» <http://www.ifm.com/products/es/ds/TN2531.html>. (Último acceso: 13 April 2017).
- [6] IFM electronic, «IFM-PK5524,» <http://www.ifm.com/products/es/ds/PK5524.html>. (Último acceso: 13 Abril 2017).
- [7] IFM electronic, «TFM-PN2024,» <http://www.ifm.com/products/es/ds/PN2024.html>. (Último acceso: 13 abril 2017).
- [8] IFM electronic, «IFM-SI6800,» <http://www.ifm.com/products/es/ds/SI6800.html> (Último acceso: 13 Abril 2017).
- [9] IFM electronic, «IFM-KG0008,» <http://www.ifm.com/products/es/ds/KG0008.html>. (Último acceso: 13 Abril 2017).
- [10] KSR KUEBLER, «KSR KUEBLER 1003,» <http://www.processpartner.no/files/processpartner.no/Documents/Instrumentering/Niv%C3%A5/Niv%C3%A5brytere/KSR/1003-4%20Float%20switches.pdf>. (Último acceso: 13 Abril 2017).
- [11] GENE BRE, «GENE BRE-5008,» <http://www.genebre.es/download/file/ZG9jdW1lbnRvcy9vdHJvcy81ODAwX2duLnBkZg==> (Último acceso: 13 Abril 2017).
- [12] SAUTER, «SAUTER AVM 234S,» http://www.sauter-controls.com/uploads/tx_cabagpdm/873116.pdf. (Último acceso: 13 Abril 2017).
- [13] SIEMENS, «SIEMENS AUTOMATION SUPPORT,» SIEMENS, <https://support.industry.siemens.com/cs/search?search=siemens%20tia%20portal>. (Último acceso: 24 Mayo 2017)

OPTIMIZACIÓN Y CONTROL EN CASCADA DE TEMPERATURA DE RECINTO MEDIANTE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN

David Rodríguez, José A. Alfaya, Guillermo Bejarano, Manuel G. Ortega
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla
{drgarcia, jalonso9, gbejarano, mortega}@us.es

Resumen

Este artículo analiza la eficiencia energética de un ciclo de refrigeración, generando un optimizador de referencias para el control basado en aproximaciones lineales. Se plantean dos enfoques de control: el control de potencia, en el cual se propone un controlador robusto descentralizado para la regulación de la potencia frigorífica dada por el ciclo, y el control de temperatura de recinto, en el cual se considera también la dinámica del recinto a refrigerar y se propone una estructura de control en cascada donde un controlador externo genera las referencias de potencia frigorífica al controlador interno del ciclo de refrigeración. Se analizan en simulación y también experimentalmente el seguimiento de referencias y el rechazo de perturbaciones en ambas estrategias de control.

Palabras clave: Sistemas de refrigeración, Optimización estática, Control en cascada, Planta experimental.

1. INTRODUCCIÓN

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor constituye el método más extendido para la generación de frío. Estos sistemas se utilizan en áreas tan diversas como regulación de la temperatura en estancias habitadas, almacenamiento y transporte de alimentos y múltiples procesos industriales. Dado el considerable impacto causado por el consumo energético de estos sistemas en los balances económicos y medioambientales, detallado por múltiples informes [9, 15, 16], así como teniendo en cuenta la escasez creciente de fuentes de energía fósiles y el desarrollo todavía lento de tecnologías de energía renovable, la operación óptima en términos de eficiencia energética de los sistemas de refrigeración por compresión de vapor existentes se presenta como un problema clave.

En un ciclo de refrigeración se extrae energía térmica del recinto a refrigerar (en concreto del fluido secundario del evaporador) y se aporta calor al fluido secundario del condensador. Las variables manipulables son la velocidad de giro del

compresor N y la apertura de la válvula de expansión A_v , considerándose los caudales de los fluidos secundarios y sus temperaturas de entrada perturbaciones al ciclo. El principal objetivo de control es proporcionar la potencia frigorífica demandada \dot{Q}_e , lo que puede reflejarse en una referencia para la temperatura de salida del fluido secundario del evaporador ($T_{e,sec,out}$). Como se dispone de dos acciones de control, se plantea un segundo objetivo, consistente en producir la potencia frigorífica requerida maximizando la eficiencia energética, descrita mediante el Coeficiente de Comportamiento (COP), cuya definición se incluye en (1).

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_{comp}} \quad (1)$$

La eficiencia del evaporador (su capacidad de extraer calor de su fluido secundario), depende principalmente del coeficiente de transferencia de calor. Este es mucho mayor para flujo bifásico que para vapor sobrecalentado, debido al cambio de fase, de forma que se alcanzaría alta eficiencia energética si el flujo de refrigerante en el evaporador fuese totalmente bifásico. Sin embargo, puesto que la salida del evaporador coincide con la aspiración del compresor, se debe evitar la presencia de gotas de refrigerante líquido en la succión del mismo. Esto se consigue tradicionalmente en la industria operando el sistema con un cierto grado de sobrecalentamiento del refrigerante (T_{SH}) a la salida del evaporador, que se suele mantener bajo para alcanzar un alto COP .

Sin embargo, es posible plantear una optimización global cuya solución sea un ciclo que genere la potencia frigorífica requerida con máxima eficiencia energética. En esta línea, Jain y Alleyne plantean una optimización global que minimiza la exergía destruida [6]; se genera un ciclo óptimo a la vez que se calculan valores óptimos de las variables manipulables, útiles para estrategias de control *feed-forward*. Por su parte, Bejarano *et al.* proponen un optimizador global no lineal cuyo criterio de eficiencia es el propio COP [3, 4]. Sin embargo, la carga computacional de este optimizador no es despreciable, debido a la propia no linealidad del proceso y la exploración exhaustiva necesaria pa-

Tabla 1: Nomenclatura

Símbolos latinos		Símbolos griegos	
A_v	Apertura de válvula [%]	α	Coficiente de pérdidas por convección entre el recinto y el ambiente [W K^{-1}]
c_p	Calor específico a presión constante [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]	ρ	Densidad [kg m^{-3}]
f	Pendiente de recta de aproximación	ω	Frecuencia [rad s^{-1}]
$G(s)$	Función de transferencia	Subíndices y superíndices	
\dot{m}	Caudal másico [kg s^{-1}]	<i>amb</i>	ambiente
N	Velocidad de giro del compresor [Hz]	<i>c</i>	condensador
P	Presión [bar]	<i>e</i>	evaporador
\dot{Q}_e	Potencia frigorífica [W]	<i>in</i>	entrada
\dot{Q}_R	Potencia térmica de la resistencia eléctrica [W]	<i>min</i>	mínimo
R	Resistencia eléctrica	<i>nom</i>	nominal
T	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	<i>out</i>	salida
$T(s)$	Función de sensibilidad complementaria	<i>ref</i>	referencia
T_{SH}	Grado de sobrecalentamiento [$^{\circ}\text{C}$]	<i>sec</i>	fluido secundario
V	Volumen [m^3]	<i>tanque</i>	tanque
\dot{W}_{comp}	Potencia mecánica del compresor [W]		
$W_T(s)$	Ponderación de la función de sensibilidad complementaria		

ra evitar extremos locales. En el presente trabajo se analizan los resultados en régimen permanente del sistema en cuanto a la eficiencia energética y se propone una optimización estática basada en aproximaciones lineales calculadas en base a la característica estática del sistema, de forma que se reduce el tiempo de cálculo en gran medida.

En cuanto al control, la dificultad de controlar este tipo de proceso reside en las altas inercias térmicas, el alto acoplamiento de las variables del sistema y su carácter fuertemente no lineal. En este trabajo se plantean dos enfoques de control: control en potencia y control de temperatura de recinto. En el control en potencia, se le exige al ciclo que satisfaga una cierta demanda de frío \dot{Q}_e^{ref} , la cual, dada una cierta temperatura de entrada del fluido secundario del evaporador $T_{e,sec,in}$ y un cierto caudal $\dot{m}_{e,sec}$, se refleja en una referencia para $T_{e,sec,out}$, de acuerdo a (2).

$$T_{e,sec,out}^{ref} = T_{e,sec,in} - \frac{\dot{Q}_e^{ref}}{c_{p,e,sec} \dot{m}_{e,sec}} \quad (2)$$

Las técnicas lineales de control más utilizadas en la literatura son el control descentralizado [8, 17], el control multivariable por desacoplo [14], control LQG [12, 13], control predictivo [5, 10] y control robusto H_{∞} [1, 7]. En este trabajo se presenta un controlador robusto descentralizado diseñado con el método de la parametrización afín por cancelación de dinámica, que se prueba en simulación tanto en seguimiento de referencia de potencia, co-

mo en rechazo de perturbaciones al ciclo.

En el caso del control de temperatura de recinto, es necesario tener en cuenta también la dinámica del mismo, en el cual hay un cierto volumen de fluido secundario almacenado, del cual se extrae un cierto caudal que se hace pasar por el evaporador del ciclo y se recircula al propio recinto. Para simular la carga térmica se supone que existe un aporte externo de calor al recinto. En este caso $T_{e,sec,in}$ se coincidiría con la temperatura del tanque T_{tanque} , supuesta homogeneización de la temperatura del fluido, y es esta la variable a controlar, actuando la potencia frigorífica generada por el ciclo como acción de control para el controlador de la temperatura del recinto. Se propone en este trabajo una estructura de control en cascada, en la cual un controlador externo genera la referencia de potencia para el ciclo, mientras que un controlador interno se encarga de satisfacer dicha demanda mediante la variación de N y A_v . Se analizan en simulación el seguimiento de referencia de la temperatura del recinto, así como el rechazo de perturbaciones sobre el aporte externo de calor.

Ambas estrategias de control han sido asimismo aplicadas a una planta experimental de refrigeración situada en el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Sevilla, cuya descripción puede consultarse en la bibliografía asociada [2]. El artículo se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2 se dan algunos detalles sobre el simulador del ciclo de refrigeración y se describe el modelo térmico del recinto a

refrigerar. La Sección 3 está dedicada a la optimización estática de las referencias para el control del ciclo, mientras que en las Secciones 4 y 5 se analizan en simulación y experimentalmente los resultados de la aplicación del controlador de potencia frigorífica y de temperatura de recinto, respectivamente. Finalmente, en la Sección 6 se resumen las principales conclusiones y se proponen algunos trabajos futuros.

2. SIMULADOR DEL SISTEMA

La Figura 1 muestra el simulador dinámico desarrollado para el ciclo de refrigeración, que se conecta al simulador del recinto a través del fluido secundario.

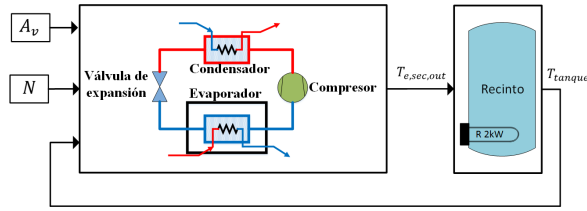


Figura 1: Simulador del ciclo de refrigeración y el recinto a refrigerar

Para el desarrollo de este simulador se ha asumido que la dinámica del condensador es dominante sobre el resto de los componentes del sistema [3]. El modelo térmico del recinto se muestra en (3), donde se aplica un balance de potencia incluyendo la potencia frigorífica generada por el ciclo \dot{Q}_e , el aporte externo de calor (modelado como una resistencia eléctrica que genera la potencia térmica \dot{Q}_R) y las pérdidas térmicas con el ambiente.

$$\begin{aligned} \rho_{e,sec} c_{p,e,sec} V_{tanque} \frac{dT_{tanque}}{dt} = \\ = \dot{Q}_R - \dot{Q}_e - \alpha (T_{tanque} - T_{amb}) \end{aligned} \quad (3)$$

Las pérdidas térmicas se consideran pequeñas en comparación con las otras potencias, de forma que se desprecian en los cálculos siguientes. El sistema cuenta con dos entradas manipulables que se corresponden con el porcentaje de apertura de la válvula de expansión $A_v \in [10, 100]\%$ y la velocidad de giro del compresor $N \in [30, 50]$ Hz. Como variables de interés se tienen $T_{e,sec,out}$, $T_{e,sec,in}$ (que será considerada como la temperatura del recinto T_{tanque} , ya que en la planta experimental a partir de la que se ha desarrollado el simulador no se tienen medidas directas de la temperatura del recinto, como se muestra en la Figura 2), T_{SH} y \dot{Q}_e . Como perturbaciones del sistema se tienen $T_{c,sec,in}$, $\dot{m}_{c,sec}$, $P_{c,sec}$, $\dot{m}_{e,sec}$, $P_{e,sec}$, T_{amb} y \dot{Q}_R , cuyos valores nominales, mínimos y máximos esperados se recogen en la Tabla 2. El simulador

del ciclo ha sido ajustado a la planta experimental citada anteriormente mediante identificación en régimen permanente de los parámetros de cada uno de los elementos del ciclo [11].

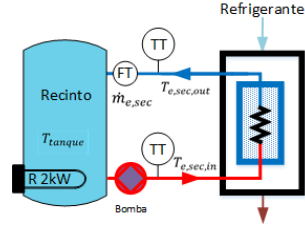


Figura 2: P&ID del recinto experimental

Tabla 2: Condiciones nominales de las perturbaciones al sistema y valores mínimos y máximos considerados.

Perturbación	Valor nominal	Valor mínimo	Valor máximo
$T_{c,sec,in}$ [°C]	30	27	33
$\dot{m}_{c,sec}$ [kg s ⁻¹]	0.150	0.125	0.175
$P_{c,sec}$ [bar]	1	-	-
$\dot{m}_{e,sec}$ [kg s ⁻¹]	0.0645	0.0545	0.0745
$P_{e,sec}$ [bar]	1	-	-
T_{amb} [°C]	25	-	-
\dot{Q}_R [W]	-	0	2000

3. OPTIMIZACIÓN ESTÁTICA

Se han realizado simulaciones bajo distintas condiciones de perturbaciones y de variables manipulables del ciclo, considerado los rangos indicados en la Tabla 2. En la Figura 3 se muestran los valores de COP en equilibrio para una cierta apertura de válvula constante e imponiendo diferentes valores de las perturbaciones al ciclo. Esta gráfica debe analizarse cualitativamente, ya que la tendencia es idéntica para todo el rango de A_v . Se observa que, para las condiciones de funcionamiento evaluadas, el valor máximo de COP se alcanza para la velocidad mínima de compresor.

Por otro lado, en la Figura 4 se muestra la variación de la potencia frigorífica para valores nominales de las perturbaciones e imponiendo diferentes valores de las variables manipulables, donde se pueden apreciar el rango de potencia que se consigue para cada velocidad del compresor. Se observa que, dada una cierta potencia frigorífica, esta puede generarse con todo el rango del compresor, excepto en los extremos del intervalo admisible de potencias. De este modo, la forma óptima de satisfacer una cierta demanda de frío es imponer la mínima velocidad del compresor siempre que sea posible. Esta imposición se realiza de cara al control mediante la referencia de T_{SH} , ya que la re-

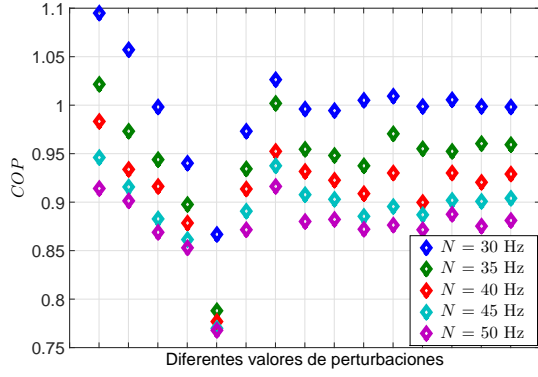


Figura 3: COP en régimen permanente para diferentes valores de perturbaciones, con A_v constante

ferencia de \dot{Q}_e o equivalentemente $T_{e,sec,out}$ viene impuesta por la demanda de frío.

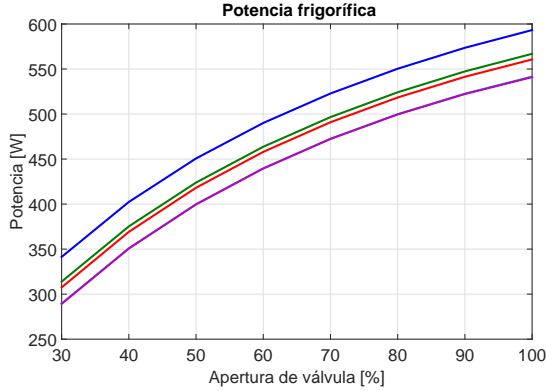


Figura 4: Rango de potencia frigorífica generada

En base a las conclusiones extraídas se ha diseñado un generador de referencia para el grado de sobrecalentamiento que fuerza al ciclo a una velocidad de compresor mínima para la obtención de la potencia frigorífica deseada. Para estimar la consigna T_{SH}^{ref} se ha realizado el siguiente método en base a datos de simulación. Manteniendo constante $N = 30$ Hz, se ha barrido todo el rango admisible de A_v con diferentes valores de las perturbaciones $T_{c,sec,in}$, $\dot{m}_{c,sec}$, $T_{e,sec,in}$ y $\dot{m}_{e,sec}$, despreciando esta última al no producir variaciones apreciables sobre T_{SH} . Una vez recogidos los valores de T_{SH} para los rangos indicados en la Tabla 2, se han buscando relaciones, mediante rectas con pendiente variable que han sido a su vez calculadas mediante simulación, con cada una de las perturbaciones y, en base a un punto de equilibrio precalculado para las condiciones nominales del sistema, se estima T_{SH}^{ref} como la suma de un valor nominal conocido y la aportación de cada una de las variaciones de las perturbaciones con respecto a las condiciones nominales, como se indica en (4). En la Figura 5 se muestran algunos resultados generados por el

estimador en comparación con los que genera el optimizador no lineal citado en la Sección 1 como referencias óptimas [4].

$$T_{SH}^{ref} = T_{SH,nom} + f(\dot{m}_{c,sec})(\dot{m}_{c,sec} - \dot{m}_{c,sec,nom}) + f(T_{c,sec,in})(T_{c,sec,in} - T_{c,sec,in,nom}) + f(T_{e,sec,in})(T_{e,sec,in} - T_{e,sec,in,nom}) \quad (4)$$

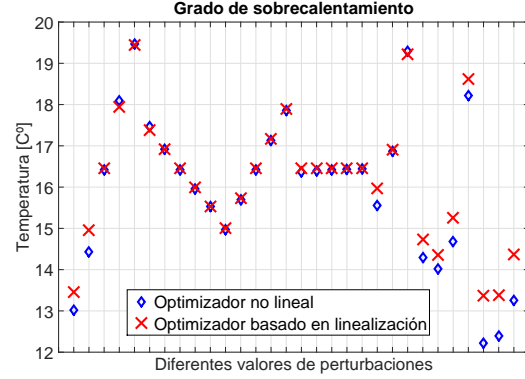


Figura 5: Estimador de valores admisibles de T_{SH} para $N = 30$ Hz

4. CONTROL EN POTENCIA

4.1. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Se utilizan técnicas de control robusto para diseñar un controlador descentralizado, donde $T_{e,sec,out}$ se controla manipulando A_v , y T_{SH} se controla mediante N . En base a una función de transferencia nominal $G_{nom}(s)$, se consideran incertidumbres estructurales debido a la dinámica de evaporador, la cual, como se comentó en la Sección 2, había sido despreciada. Se han considerado también incertidumbres paramétricas en $G_{nom}(s)$ debido a cómo se ve afectado el sistema según el punto de equilibrio del que parte. Posteriormente se ha definido la ponderación $W_{T_{e,sec,out}}(s)$ de la función de sensibilidad complementaria $T_{T_{e,sec,out}}(s)$ para $T_{e,sec,out}$ con respecto a A_v , así como la ponderación $W_{T_{SH}}(s)$ de la función de sensibilidad complementaria $T_{T_{SH}}(s)$ de T_{SH} con respecto a N , de forma que se cumplan los criterios de robustez, como se muestra en las Figuras 6 y 7. Aplicando parametrización afín con cancelación de dinámica se han obtenidos los controladores desacoplados correspondientes.

Además, ya que el objetivo del optimizador, para una cierta demanda de frío, es calcular el valor de T_{SH}^{ref} tal que la velocidad del compresor sea mínima en régimen permanente, se ha realizado

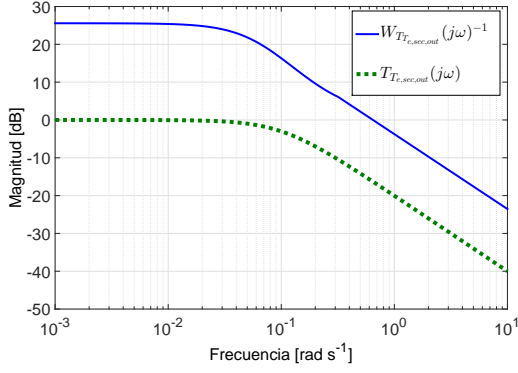


Figura 6: Ganancia de la función de sensibilidad complementaria $T_{e,sec,out}(s)$ de $T_{e,sec,out}$ respecto a A_v y su ponderación $W_{T_{e,sec,out}}(s)$

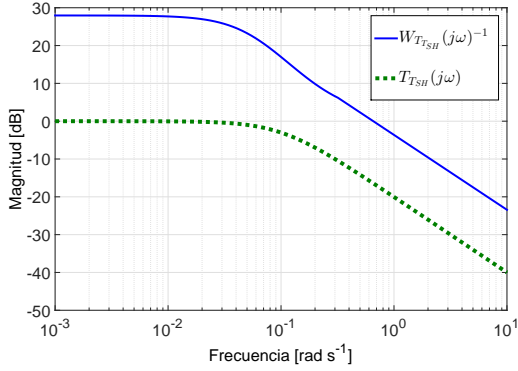


Figura 7: Ganancia de la función de sensibilidad complementaria $T_{SH}(s)$ de T_{SH} respecto a N y su ponderación $W_{T_{SH}}(s)$

una comparativa entre controlar $T_{e,sec,out}$ y T_{SH} simultáneamente, y controlar solo $T_{e,sec,out}$ dejando libre T_{SH} y fijando el compresor a su velocidad mínima. Para ello se han simulado ambos casos bajo el mismo perfil de perturbaciones mostrado en la Figura 8 y aplicando los cambios de referencia de Q_e mostrados en la Figura 9.

La Figura 10 muestra la evolución de $T_{e,sec,out}$ y T_{SH} , cuando se controla explícitamente T_{SH} y cuando se deja libre, mientras que la Figura 11 muestra el COP alcanzado en ambos casos. Se puede observar que cuando se alcanza el equilibrio, el resultado entre controlar T_{SH} y dejarlo libre, fijando la velocidad del compresor a su valor mínimo, es prácticamente idéntico. Sin embargo, cuando el sistema experimenta una perturbación el COP obtenido para el caso del T_{SH} controlado es inferior al caso en que se deja libre, por lo que se llega a la conclusión que para las condiciones de funcionamiento del sistema la forma óptima de satisfacer la demanda de frío es manteniendo fija la velocidad del compresor a su valor mínimo.

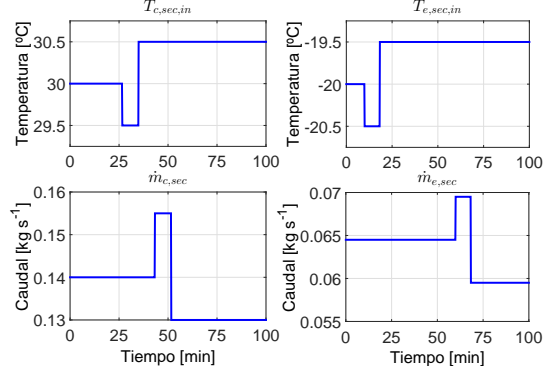


Figura 8: Perfil de perturbaciones

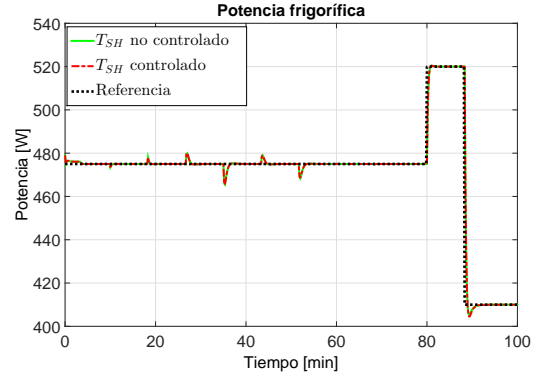


Figura 9: Potencia frigorífica generada

4.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este apartado se pretenden replicar los resultados de simulación en un experimento real, para lo que se utiliza la planta experimental citada en la Sección 1 [2]. La planta puede configurarse con hasta 2 compresores y hasta 2 evaporadores. Cada evaporador está conectado por un circuito de fluido secundario a un tanque, de forma que se puede trabajar a temperaturas de referencia de 5°C y -20°C. Se dispone de sensores de temperatura y presión en los puntos característicos del sistema. Además, existe un sensor de caudal para cada fluido secundario, así como una bomba que permite su recirculación. Para simular la carga térmica en los tanques se dispone de dos resistencias eléctricas. El refrigerante utilizado es $R404a$, mientras que los fluidos de los circuitos secundarios son una solución acuosa de glicol. El condensador empleado es de flujo cruzado, cuyo fluido secundario es el aire exterior que se mueve mediante un ventilador.

Por motivos técnicos, los experimentos se han realizado en el tanque a 5°C. Esto implica un punto de funcionamiento diferente al estudiado en la simulación mostrada anteriormente, por tanto el controlador diseñado ha sido reajustado. Además,

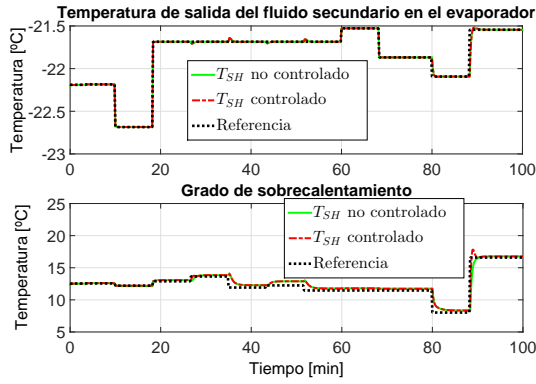


Figura 10: Resultados del control de $T_{e,sec,out}$ y T_{SH}

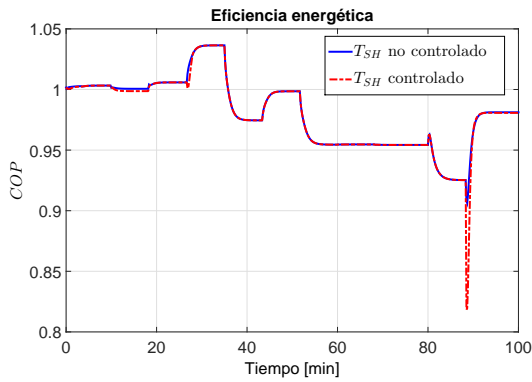


Figura 11: Eficiencia energética

debido al sobredimensionamiento del condensador se ha implementado un controlador *todo-nada* sobre el ventilador con el fin de ajustar la presión del condensador a la presión obtenida en simulación.

Siguiendo las conclusiones del estudio realizado en simulación, se decide no controlar T_{SH} , imponiendo $N = 30$ Hz. En el experimento de la Figura 12 se replican los dos cambios de referencia de potencia de la Figura 9: el primero en el minuto 51 aproximadamente con un escalón de 50 W, mientras que el segundo se realiza en el minuto 64 con un escalón negativo de 100 W. Para mantener constante a 5°C la temperatura de entrada del fluido secundario al evaporador se ha diseñado un controlador que ajusta la potencia térmica aportada por la resistencia eléctrica \dot{Q}_R .

El rizado que se observa en la potencia frigorífica generada es debido al control *todo-nada* implementado para el ventilador del condensador, ya que la variación de la presión del condensador afecta a los caudales del ciclo y por tanto a la transferencia de calor del evaporador. En la segunda subfigura se puede observar que el controlador alcanza las referencias pedidas con un tiempo de subida de unos 74 segundos con una sobreoscila-

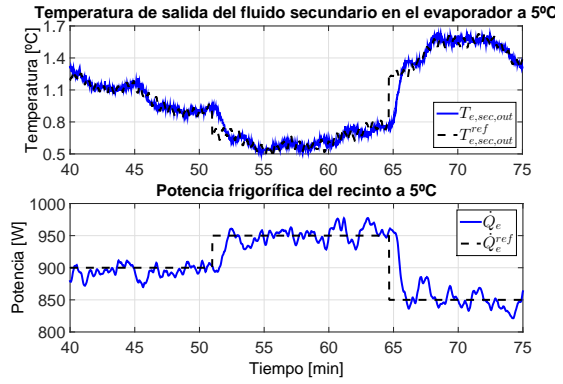


Figura 12: Experimento de control en potencia

ción del 20%. Los resultados de control se pueden considerar suficientes como primera aproximación para el control de este proceso. Asimismo, en la primera subfigura se puede observar que los cambios de referencia de potencia frigorífica provocan cambios de referencia sobre $T_{e,sec,out}$, que es la variable realmente controlada mediante A_v .

5. CONTROL DE TEMPERATURA DE RECINTO

5.1. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Una vez diseñado el control de potencia se aplica la generación de frío para controlar la temperatura de un recinto. Para ello, como muestra la Figura 1, se ha añadido el modelo térmico del recinto basado en (3). Se propone la estrategia de control en cascada mostrada en la Figura 13. Dada T_{tanque}^{ref} y conocida T_{tanque} , la cual es indirectamente medida, se calcula el valor de potencia deseada \dot{Q}_e^{ref} mediante el controlador externo PI. Una vez conocida la referencia de potencia, el controlador interno se corresponde con el desarrollado en la Sección 4, el cual en base a las conclusiones extraídas se realizará únicamente controlando $T_{e,sec,out}$ por medio de A_v y manteniendo el compresor a su velocidad mínima y dejando T_{SH} libre. En la Figura 14 se pueden observar los resultados del control de la temperatura del recinto y la potencia como acción de control del controlador externo.

5.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se replica experimentalmente el control en cascada diseñado y aplicado en los resultados de simulación obtenidos en la Figura 14. De manera análoga al primer experimento, se han adaptado las ganancias del controlador para el recinto a 5°C de la planta experimental y se ha utilizado un con-

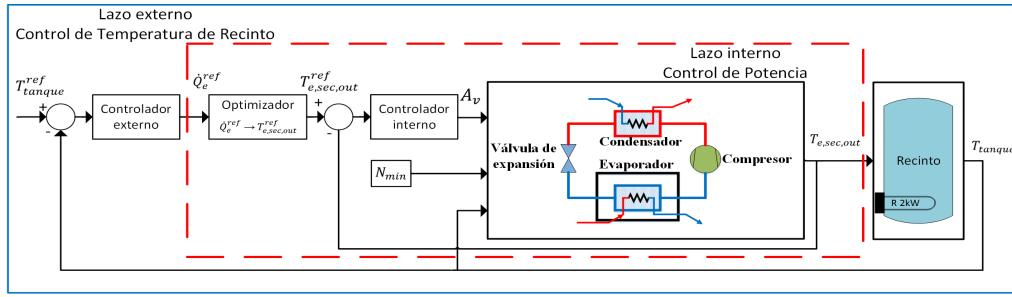


Figura 13: Estructura de control en cascada para la temperatura del recinto a refrigerar

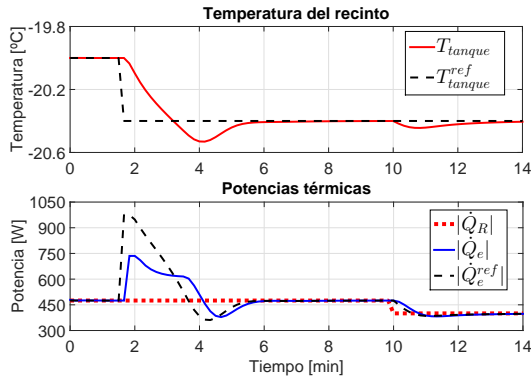


Figura 14: Resultados de simulación del control en cascada de la temperatura del recinto

trol *todo-nada* para la presión del condensador. En este caso la carga térmica del recinto simulada mediante la resistencia eléctrica actúa como una perturbación a la temperatura del recinto.

En la Figura 15 se muestran los resultados experimentales obtenidos, donde se realiza un cambio de referencia en la temperatura del tanque en el minuto 57 aproximadamente de -0.4°C , mientras que se impone una reducción del 10 % en la potencia térmica aportada por la resistencia en el minuto 87 aproximadamente.

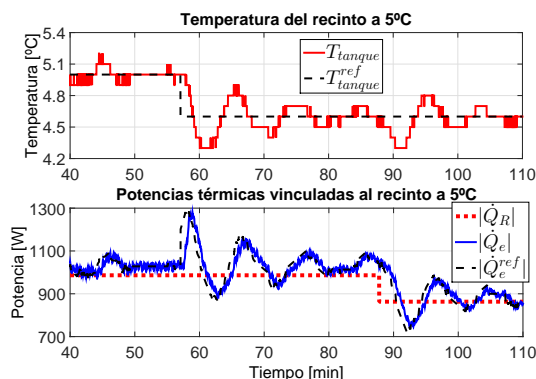


Figura 15: Resultados experimentales del control en cascada de la temperatura del recinto

En la primera subfigura se muestra la temperatura del tanque y su referencia, mientras que en la segunda aparecen la potencia frigorífica generada por el ciclo y su referencia (consecuencia del control en cascada), así como la potencia térmica generada por la resistencia. En el cambio de referencia se obtiene un tiempo de subida de 130 segundos y una sobreoscilación del 70 %, mientras que se puede observar cómo el controlador rechaza la perturbación en la temperatura y cómo la potencia frigorífica se adapta rápidamente al cambio aplicado sobre la resistencia. Estos resultados preliminares significan un punto de partida para mejorar el control en futuros experimentos.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este artículo se ha presentado un optimizador estático para la referencia del grado de sobrecalentamiento de un ciclo de refrigeración. En base al análisis estático del comportamiento del ciclo, se han generado una serie de aproximaciones lineales que permiten calcular el sobrecalentamiento correspondiente a la máxima eficiencia del sistema para una cierta demanda de frío, que coincide en un rango amplio de condiciones de la planta con la velocidad mínima del compresor.

Respecto al control de potencia, se ha comparado el desempeño en dos situaciones de un controlador robusto descentralizado diseñado con el método de la parametrización afín por cancelación de dinámica: por un lado controlando la potencia a través de la temperatura de salida del fluido secundario del evaporador y el grado de sobrecalentamiento, y por otro lado controlando solo la potencia y fijando la velocidad del compresor a su valor mínimo. Se concluye que, sobre todo en el rechazo de perturbaciones, la eficiencia alcanzada es muy similar en ambos casos, incluso algo mejor en el controlador que deja libre el sobrecalentamiento. Se ha aplicado este controlador experimentalmente y se obtienen resultados preliminares que pueden ser mejorados mediante el reajuste de ganancias. Con

vista a un sistema real se propone en cualquier caso la implementación de un control de supervisión del grado de sobrecalentamiento, de forma que solo actúe cuando este alcanza valores cercanos a 0°C, y cuya función sería únicamente llevar el sobrecalentamiento a una zona segura de trabajo, sacrificando el objetivo de maximizar la eficiencia.

Respecto al control de temperatura, se propone una estrategia de control en cascada en la cual la potencia resulta ser la acción de control de un controlador jerárquicamente superior que regula la temperatura del recinto. Esta estrategia ha sido aplicada también experimentalmente, obteniendo resultados preliminares que igualmente pueden ser mejorados mediante reajuste de los controladores.

Como trabajo futuro, se propone reajustar los controladores experimentales así como extender el estudio de eficiencia a sistemas con múltiples recintos y/o múltiples compresores, pudiendo ser de interés el control de la velocidad del compresor.

Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento al Ministerio de Ciencia e Innovación por la financiación de este trabajo, a través de los proyectos DPI2015-70973-R y DPI2016-79444-R.

Referencias

- [1] J. A. Alfaya, G. Bejarano, M. G. Ortega, and F. R. Rubio. Controllability analysis and robust control of a one-stage refrigeration system. *Eur. J. of Control*, 26:53–62, 2015.
- [2] G. Bejarano, J. A. Alfaya, M. G. Ortega, and F. R. Rubio. Design, automation and control of a two-stage, two-load-demand experimental refrigeration plant. In *23rd Mediterranean Conf. on Control and Autom., Torremolinos (Spain)*, pages 537–544, 2015.
- [3] G. Bejarano, J. A. Alfaya, M. G. Ortega, and M. Vargas. On the difficulty of globally optimally controlling refrigeration systems. *Appl. Therm. Eng.*, 111:1143–1157, 2017.
- [4] G. Bejarano, M. G. Ortega, and F. R. Rubio. Optimización global estática de sistemas de refrigeración. In *XXXVII Jorn. de Autom., Madrid (Spain)*, pages 19–26, 2016.
- [5] H. Fallahsohi, C. Changenet, S. Placé, C. Ligeret, and X. Lin-Shi. Predictive functional control of an expansion valve for minimizing the superheat of an evaporator. *Int. J. of Refrig.*, 33(2):409–418, 2010.
- [6] N. Jain and A. G. Alleyne. A framework for the optimization of integrated energy systems. *Appl. Therm. Eng.*, 48:495–505, 2012.
- [7] L. S. Larsen and J. R. Holm. Modelling and multi-variable control of refrigeration systems. *ECOS 2003*, 2003.
- [8] J. Marcinichen, T. del Holanda, and C. Melo. A dual SISO controller for a vapor compression refrigeration system. In *Int. Refrig. and Air Cond. Conf.*, pages 2444, 1–8, 2008.
- [9] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Build.*, 40(3):394–398, 2008.
- [10] N. L. Ricker. Predictive hybrid control of the supermarket refrigeration benchmark process. *Control Eng. Pract.*, 18(6):608–617, 2010.
- [11] D. Rodríguez, G. Bejarano, J. A. Alfaya, M. G. Ortega, and F. Castaño. Parameter identification of a multi-stage, multi-load-demand experimental refrigeration plant. *Control Eng. Pract.*, 60:133–147, 2017.
- [12] L. C. Schurt, C. J. L. Hermes, and A. Trofino-Neto. A model-driven multivariable controller for vapor compression refrigeration systems. *Int. J. of Refrig.*, 32(7):1672–1682, 2009.
- [13] L. C. Schurt, C. J. L. Hermes, and A. Trofino-Neto. Assessment of the controlling envelope of a model-based multivariable controller for vapor compression refrigeration systems. *Appl. Therm. Eng.*, 30(13):1538–1546, 2010.
- [14] Y. Shen, W.-J. Cai, and S. Li. Normalized decoupling control for high-dimensional MIMO processes for application in room temperature control HVAC systems. *Control Eng. Pract.*, 18(6):652–664, 2010.
- [15] US Energy Information Administration. Residential energy consumption survey (RECS). Technical report, Energy Inf. Adm., Washington D.C, USA, 2009.
- [16] US Environmental Protection Agency. National action plan for energy efficiency: Sector collaborative on energy efficiency accomplishments and next steps.
- [17] J. Wang, C. Zhang, Y. Jing, and D. An. Study of neural network PID control in variable-frequency air-conditioning system. In *IEEE Int. Conf. on Control and Autom.*, pages 317–322, 2007.

Diseño LQ e implementación distribuida para la estimación de estado

A. R. del Nozal, L. Orihuela, P. Millán, C. Ierardi, A. Tapia

Universidad Loyola Andalucía, {arodriguez,dorihuela,pmillan,cierardi,atapia}@uloyola.es

Resumen

Este artículo trata el problema de la estimación distribuida del estado de una planta por dos agentes. El objetivo de cada uno de los agentes es reconstruir el estado completo a partir de sus propias medidas y la información intercambiada con el otro. Para ello, se introduce una novedosa estructura de observador en la cual se divide el espacio de estados en la parte observable por el agente en cuestión y la parte no observable por él. El diseño de las ganancias del observador se lleva a cabo mediante la resolución de un problema LQ en el que el usuario puede variar dos parámetros escalares para lograr una observación adecuada. Se introduce dicho algoritmo para una red con dos agentes siendo su generalización para un número indeterminado de agentes un posible futuro trabajo.

Palabras clave: Estimación distribuida. Sistemas multi-agente. Sistemas invariantes en tiempo. Programación LQ.

1. Introducción

Cuando se considera el problema de la estimación del estado de una planta de grandes dimensiones, como puedan ser grandes factorías o cadenas de producción, la complejidad del problema crece exponencialmente. El hecho de que la información de dichos sistemas sea recolectada por muchos agentes unido a la lejana situación geográfica de éstos complica enormemente el diseño de los observadores. Sin embargo ofrece infinidad de ventajas respecto a los antiguos sistemas centralizados como puede ser la robustez, la escalabilidad o la flexibilidad respecto a cambios en la topología de la red o del sistema a observar.

El problema de la estimación distribuida del estado de una planta ha sido abordado desde diferentes perspectivas desde hace años, aunque seguramente, el estimador más conocido sea el filtro de Kalman distribuido [5, 6]. El filtro de Kalman distribuido ha atraído la atención de muchos investigadores y no solo en el campo de la ingeniería

de control, sino también en otros campos como pueden ser el procesamiento de señales [4], la visión artificial [7] o el campo de la óptica [2] por nombrar algunos. La mayoría de filtros de Kalman distribuido aplicados en la práctica funcionan con dos fases principales: Primero alcanzan un consenso entre los agentes y posteriormente cada uno aplica un filtro que contribuye a la estabilización de la estimación conjunta del estado. Estrategias de consenso son también utilizadas en [8], [9] y [10], donde los autores proponen el diseño de filtros H_∞ .

El estudio de la descomposición del espacio de estados en las partes observable y no observable por el agente ya ha sido estudiado en previos trabajos de los autores, vease [3] y [1]. En el primero, el observador utilizado es propuesto para una red con dos agentes ofreciendo condiciones de estabilidad. El segundo de ellos trata la aplicación de un filtro de Kalman distribuido para este tipo de arquitectura en la que se llevan a cabo una serie de simplificaciones. Este artículo se centra en el diseño de las ganancias del observador.

Desde el punto de vista de la topología de comunicación la mayoría de los trabajos parte de la formulación en la que ningún agente es capaz de reconstruir el estado por sí mismo. Es decir, los agentes deben colaborar entre ellos. Aunque en nuestra red solo se considere una pareja de agentes, también se tiene esta consideración.

Este artículo constituye un trabajo preliminar considerando una red de únicamente dos agentes. La intención de los autores es mostrar el potencial de la estructura de observador presentada y la capacidad de diseño mediante un algoritmo LQ por el cual sea solo necesario ajustar el valor de dos escalares. De esta manera no es necesario tener profundos conocimientos de control para el ajuste del mismo.

El artículo esta organizado de la siguiente manera. La Sección 2 introduce la formulación del problema que se va a abordar así como algunas definiciones y simplificaciones llevadas a cabo. En la Sección 3 se muestra la estructura de observador considerada cuyo diseño se trata en la Sección 4.

Finalmente en las secciones 5 y 6 algunas simulaciones y las conclusiones son presentadas.

2. Formulación del problema

Considere un sistema discreto, lineal, autónomo e invariante en el tiempo y dos agentes (1 y 2) tomando medidas del sistema con la siguiente representación en el espacio de estados:

$$x^+ = Ax + w, \quad (1)$$

$$y_1 = C_1 x + n_1, \quad (2)$$

$$y_2 = C_2 x + n_2, \quad (3)$$

donde $y_1 \in \mathbb{R}^{m_1}$ y $y_2 \in \mathbb{R}^{m_2}$ son vectores que representan la salida del sistema para el agente 1 y 2 respectivamente; $C_1 \in \mathbb{R}^{m_1 \times n}$ y $C_2 \in \mathbb{R}^{m_2 \times n}$ son las matrices de salida de ambos agentes y $w \in \mathbb{R}^n$, $n_1 \in \mathbb{R}^{m_1}$ y $n_2 \in \mathbb{R}^{m_2}$ son perturbaciones y ruidos mutuamente independientes.

La estructura del observador propuesta en la siguiente sección esta basada en la consideración de una transformación del sistema a la forma observable escalonada. Por la cual, es posible obtener una matriz de transformación lineal $T \in \mathbb{R}^{n \times n}$ de tal forma que ante el cambio de variable $\xi \triangleq Tx$ es posible transformar la representación en espacio de estados del sistema en la siguiente:

$$\xi_i^+ = T_i A T_i^T \xi_i = \begin{bmatrix} A_i^{\bar{o}} & \tilde{A}_i \\ 0 & A_i^o \end{bmatrix} \xi_i, \quad (4)$$

$$y_i = C_i T_i^T \xi = \begin{bmatrix} 0 & \tilde{C}_i \end{bmatrix} \xi_i, \quad (5)$$

donde el estado transformado ξ puede ser dividido:

$$\xi_i = \begin{bmatrix} \xi_i^{\bar{o}} \\ \xi_i^o \end{bmatrix}$$

siendo $\xi_i^{\bar{o}} \in \mathbb{R}^{n\bar{o}}$ y $\xi_i^o \in \mathbb{R}^{no}$ respectivamente la parte no observable y observable del sistema (1) por un agente genérico i cuando el sistema no se encuentra afectado por ruido. Tenga en cuenta que la parte observable se encuentra completamente desacoplada de la no observable (A_i^o, \tilde{C}_i), gracias a la estructura con forma de cascada.

Además, la matriz de transformación lineal T_i puede ser descompuesta a su vez $T_i = [\bar{V}_i \ V_i]^T$, donde $\bar{V}_i \in \mathbb{R}^{n \times n\bar{o}_i}$ esta compuesto por $n\bar{o}_i$ vectores columnas en \mathbb{R}^n formando una base ortonormal del subespacio no observable del sistema (1)-(2). A su vez, $V_i \in \mathbb{R}^{n \times no_i}$ es una base ortonormal de la parte observable. Ambas bases son mutuamente ortogonales y juntas, forman el espacio completo \mathbb{R}^n . Ya que T_i es una matriz ortogonal se cumplen las siguientes propiedades:

$$\bar{V}_i^T \bar{V}_i = I_{n\bar{o}_i}, \quad V_i^T V_i = I_{no_i},$$

$$\bar{V}_i^T V_i = 0_{n\bar{o}_i \times no_i}, \quad V_i^T \bar{V}_i = 0_{no_i \times n\bar{o}_i}.$$

Definición 1. El error de estimación cometido por un agente i es definido como:

$$e_i = x - \hat{x}_i.$$

Definición 2. El error de estimación cometido por un agente i en la base escalonada observable se define como:

$$\varepsilon_i = \xi - \hat{\xi}_i.$$

Al igual que pasaba con el estado, el error puede ser dividido en su parte observable y no observable:

$$\varepsilon_i = \begin{bmatrix} \varepsilon_i^{\bar{o}} \\ \varepsilon_i^o \end{bmatrix}.$$

Suposición 1. Suponemos que existe observabilidad colectiva del sistema. Esto es, el conjunto de agentes considerado es capaz de observar todas las componentes del estado. Es decir, la pareja $(A, [C_1^T C_2^T]^T)$ es observable.

Del mismo modo la observabilidad local del sistema no es considerada, es decir, ningún agente es capaz de reconstruir el estado completo basado en sus propias medidas.

Suposición 2. Para el caso objeto de estudio se considera que no existe acople entre espacios observables de los agentes. Es decir, consideraremos que el espacio no observable por el agente i coincide con el observable por el agente j y viceversa:

$$V_i^T V_j = 0, \quad \bar{V}_i^T V_j = I$$

3. Estructura de observador propuesta

Considérese la siguiente estructura de observador para el agente 1:

$$\hat{x}_1^+ = \underbrace{A\hat{x}_1}_A + \underbrace{V_1 L_1 (y_1 - \hat{y}_1)}_B + \underbrace{\bar{V}_1 N_{1,2} \bar{V}_1^T (\hat{x}_2 - \hat{x}_1)}_C \quad (6)$$

dónde L_1 y $N_{1,2}$ son, respectivamente, una ganancia local para la estimación del agente 1 en su espacio observable y una ganancia aplicada al término de consenso. Cada uno de los componentes del observador es detallado a continuación:

A Término de predicción basado en modelo.

B Corrección local de medidas: La diferencia entre la salida del sistema y la estimada por el agente 1 es multiplicada por la ganancia L_1 . El resultado se utilizan como pesos para llevar a cabo una transformación lineal de V_1 .

C Término en consenso: Utilizando la estimación del estado realizada por el agente 2, 1 es capaz de corregir la estimación de sus estados no observables. La diferencia entre las estimaciones de ambos agentes es proyectada sobre el espacio no observable del agente 1 y ponderada por la matriz $N_{1,2}$. Así, la información provista por el agente 2 es usada para corregir los estados no observables de 1 y viceversa.

4. Diseño basado en LQ

En anteriores secciones se ha introducido el problema que se pretende resolver así como la estructura de observador propuesta. En esta sección se pretende introducir un algoritmo de diseño de las ganancias del observador basado en programación LQ.

4.1. Algoritmo de consenso basado en LQ

Considere la estructura de observador introducida en (6). Entonces, es posible construir la siguiente función de coste para el agente 1:

$$J_1(k) = \sum_{t=k}^{\infty} \kappa_1 |_r(\varepsilon_1, u_1|_L, u_1|_N, t), \quad (7)$$

dónde

$$\begin{aligned} \kappa_1(\varepsilon_1, u_1|_L, u_1|_N, t) &= \varepsilon_1(t)^T U_1 \varepsilon_1(t) \\ &+ u_1|_L^T(t) S_1 u_1|_L(t) + u_1|_N^T(t) T_1 u_1|_N(t), \end{aligned}$$

con

$$\begin{aligned} u_1|_L(k) &= -L_1 \tilde{C}_1 \varepsilon_1^o(k), \\ u_1|_N(k) &= -N_{1,2}(k) \varepsilon_1^{\bar{o}}(k) \end{aligned}$$

El significado de $u_1|_L$ and $u_1|_N$ puede ser algo confuso. El primero, es el error de estimación cometido por la parte observable del agente multiplicado por la ganancia de Luenberger L_1 . Por otro lado, $u_1|_N$ es la transformación lineal de la proyección del error de estimación en el espacio no observable por 1. Las matrices de pesos $U_1 \in \mathbb{R}^{n_{o1} \times n_{o1}}$, $S_1 \in \mathbb{R}^{n_{o1} \times n_{o1}}$ y $T_1 \in \mathbb{R}^{n_{\bar{o}1} \times n_{\bar{o}1}}$ son matrices diagonales definidas positivas.

La función de coste definida en (7) puede ser reescrita como:

$$\begin{aligned} J_1(k) &= \kappa_1(\varepsilon_1, u_1|_L, u_1|_N, k) \\ &+ \sum_{t=k+1}^{\infty} \kappa_1(\varepsilon_1, u_1|_L, u_1|_N, t) \\ &= \kappa_1(\varepsilon_1, u_1|_L, u_1|_N, k) + J_1(k+1). \end{aligned} \quad (8)$$

Supongamos entonces que el coste óptimo de esta

función objetivo viene dado por la siguiente expresión:

$$J_1^*(k) = \varepsilon_1^o(k)^T P_1|_L \varepsilon_1^o(k) + \varepsilon_1^{\bar{o}}(k)^T P_1|_N \varepsilon_1^{\bar{o}}(k),$$

dónde $J_1^*(k)$ es el coste óptimo de (7) en el instante k y dónde las matrices $P_1|_L \in \mathbb{R}^{n_{o1} \times n_{o1}}$ y $P_1|_N \in \mathbb{R}^{n_{\bar{o}1} \times n_{\bar{o}1}}$ son definidas positivas. Note el carácter cuadrático respecto al error de estimación.

Entonces, desarrollando la expresión (8) obtenemos lo siguiente:

$$\begin{aligned} J_1(k) &= \varepsilon_1(k)^T U_1 \varepsilon_1(k) + u_1|_L^T(k) S_1 u_1|_L(k) \\ &+ u_1|_N^T(k) T_1 u_1|_N(k) \\ &+ \varepsilon_1^o(k+1)^T P_1|_L \varepsilon_1^o(k+1) \\ &+ \varepsilon_1^{\bar{o}}(k+1)^T P_1|_N \varepsilon_1^{\bar{o}}(k+1). \end{aligned} \quad (9)$$

Para continuar con el desarrollo es necesario obtener la dinámica del error transformado tanto de la parte no observable como de la observable del estado. Para ello, partimos de un sistema como el expuesto en (1) pero libre de ruido y una estructura de observador como la expuesta en (6). Entonces el error de estimación viene dado por la siguiente expresión:

$$e_1^+ = (A - V_1 L_1 C_1) e_1 - \bar{V}_1 N_{1,2} \bar{V}_1^T (e_1 - e_2).$$

Si a la expresión anterior le aplicamos la transformación a forma escalonada observable definida por $\xi_1 = T_1 x$ obtenemos:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1^{\bar{o}} \\ \varepsilon_1^o \end{bmatrix}^+ = \begin{bmatrix} A_1^{\bar{o}} & \tilde{A}_1 \\ 0 & A_1^o - L_1 \tilde{C}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1^{\bar{o}} \\ \varepsilon_1^o \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} N_{1,2} \bar{V}_1^T (e_1 - e_2) \\ 0 \end{bmatrix}.$$

De esta expresión, es deducible que la dinámica del error de estimación observable se encuentra completamente desacoplada de la no observable y viene dada por:

$$\varepsilon_1^{o+} = (A_1^o - L_1 \tilde{C}_1) \varepsilon_1^o. \quad (10)$$

Del mismo modo, consideramos ahora la dinámica del error no observable:

$$\varepsilon_1^{\bar{o}+} = A_1^{\bar{o}} \varepsilon_1^{\bar{o}} + \tilde{A}_1 \varepsilon_1^o - N_{1,2} \bar{V}_1 (e_1 - e_2).$$

Por un lado, gracias a la estructura en forma de cascada del sistema tras la transformación, podemos considerar que la ganancia L_1 esta diseñada de tal manera que el error de estimación en régimen permanente de la parte observable tiene a cero con $[A_i^o - L_i \tilde{C}_i]$ Schur estable. Por otro lado, es posible reescribir la expresión $\bar{V}_1^T (e_1 - e_2)$

haciendo uso de la transformación a forma escalonada observable:

$$\begin{aligned}\bar{V}_1^T(e_1 - e_2) &= \bar{V}_1^T(V_1\varepsilon_1^o + \bar{V}_1\varepsilon_1^{\bar{o}} - V_2\varepsilon_2^o - \bar{V}_2\varepsilon_2^{\bar{o}}) \\ &= \varepsilon_1^{\bar{o}} - \varepsilon_2^o.\end{aligned}$$

Así la expresión finalmente queda:

$$\varepsilon_1^{\bar{o}+} = (A_1^{\bar{o}} - N_{1,2})\varepsilon_1^{\bar{o}} + F, \quad (11)$$

siendo F un término que tiende asintóticamente a cero cuando la parte observable se ha diseñado de tal forma que $[A_i^o - L_i\tilde{C}_i]$ es Schur estable.

Téngase en cuenta que gracias a la estructura en forma de cascada introducida por la transformación a la forma escalonada observable, es posible diseñar la ganancia local del observador de una forma completamente independiente a la que se utilizaría en el término de consenso. Cuando se considera también la parte no observable del agente, es posible obtener una expresión de la dinámica del error para esta parte que únicamente depende de sí misma y de los errores de estimación obtenidos en las partes observables de los agentes. Entonces, si el diseño de la ganancia local del agente se realiza de tal manera que la dinámica del error de estimación observable sea más rápida que la del no observable, ambos errores tenderán a cero de forma asintótica.

Entonces, volviendo a la función de coste del algoritmo basado en LQ, si sustituimos las expresiones (10) y (11) en (9) obtenemos:

$$\begin{aligned}J_1(k) &= \varepsilon_1(k)^T U_1 \varepsilon_1(k) + u_1|_L^T(k) S_1 u_1|_L(k) \quad (12) \\ &+ u_1|_N^T(k) T_1 u_1|_N(k) \\ &+ (A_1^o \varepsilon_1^o(k) + u_1|_L(k))^T P_1|_L \\ &\times (A_1^o \varepsilon_1^o(k) + u_1|_L(k)) \\ &+ (A_1^{\bar{o}} \varepsilon_1^{\bar{o}}(k) + u_1|_N(k))^T P_1|_N \\ &\times (A_1^{\bar{o}} \varepsilon_1^{\bar{o}}(k) + u_1|_N(k)).\end{aligned}$$

Dado que la función de coste presenta una forma convexa, es posible calcular el mínimo de dicha función respecto a $u_i|_L$ y $u_i|_N$ igualando las derivadas parciales a cero:

$$\begin{aligned}\frac{\partial J_1(k)}{\partial u_1|_L(k)} &= 2S_1 u_1|_L(k) \\ &+ 2P_1|_L (A_1^o \varepsilon_1^o(k) + u_1|_L(k)) = 0, \\ \frac{\partial J_1(k)}{\partial u_1|_N(k)} &= 2T_1 u_1|_N(k) \\ &+ 2P_1|_N (A_1^{\bar{o}} \varepsilon_1^{\bar{o}}(k) + u_1|_N(k)) = 0,\end{aligned}$$

lo que implica:

$$u_1|_L^*(k) = -(S_1 + P_1|_L)^{-1} P_1|_L A_1^o \varepsilon_1^o(k), \quad (13)$$

$$u_1|_N^*(k) = -(T_1 + P_1|_N)^{-1} P_1|_N A_1^{\bar{o}} \varepsilon_1^{\bar{o}}(k), \quad (14)$$

siendo $u_1|_L^*(k)$ y $u_1|_N^*(k)$ los valores de $u_1|_L(k)$ y $u_1|_N(k)$ que minimizan el valor de la función objetivo en el instante k .

Sustituyendo (13)-(14) en (12) es posible obtener las siguientes ecuaciones de Riccati para el cálculo de $P_1|_L$ y $P_1|_N$:

$$\begin{aligned}A_1^{oT} P_1|_L A_1^o - P_1|_L + V_1^T U_1 V_1 \\ &= A_1^{oT} P_1|_L (S_1 + P_1|_L)^{-1} P_1|_L A_1^o. \\ A_1^{\bar{o}T} P_1|_N A_1^{\bar{o}} - P_1|_N + \bar{V}_1^T U_1 \bar{V}_1 \\ &= A_1^{\bar{o}T} P_1|_N (T_1 + P_1|_N)^{-1} P_1|_N A_1^{\bar{o}}.\end{aligned}$$

Finalmente, una vez conocidas las matrices $P_1|_L$ y $P_1|_N$, resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones, los valores de L_1 y $N_{1,2}$ son obtenidos:

$$\begin{aligned}(S_1 + P_1|_L)^{-1} P_1|_L A_1^o &= L_1 \tilde{C}_1, \\ (T_1 + P_1|_N)^{-1} P_1|_N A_1^{\bar{o}} &= N_{1,2}.\end{aligned}$$

Sea consciente que la matriz U_1 pondera el conocimiento de la dinámica del sistema mientras que S_1 y T_1 ponderan la información provista por las medidas directas de la planta así como la información provista por el agente 2.

4.2. Diseño de las ganancias propuesto

En esta sección, un método general para diseñar las ganancias del observador es presentado. Para ello se utilizará el algoritmo basado en LQ presentado en la sección previa.

Consideremos que la incertidumbre que afecta tanto a nuestro sistema (w) como a las medidas tomadas por los diferentes agentes (n_1, n_2) pueden ser cuantificadas a través de las matrices Q y R_1 respectivamente. Es decir, por ejemplo, considere un ruido blanco de media cero y desviación típica dada por dichas matrices o considere un ruido acotado cuya cota venga almacenada en las mismas.

El objetivo principal del método es diseñar las matrices de pesos para el algoritmo LQ (U_1 , S_1 y T_1) teniendo en cuenta las siguientes tres características:

1. El error en las medidas del sistema viene dado por los valores almacenados en R_1 . Este valor afecta directamente a las matrices de pesos S_1 y T_1 .
2. La distancia entre el agente 1 y el agente que constituye la fuente de información para reconstruir su espacio no observable. En nuestro caso, al solo considerar dos agentes podemos suponer que existen dos vías de comunicación con velocidades de transferencia

diferentes. Este hecho afectará a la matriz de peso T_1 .

3. La incertidumbre introducida en la evolución del estado ya sea por ruidos o por no linealidades no consideradas son definidas por la matriz Q . Este factor actúa directamente sobre la matriz U_1 .

Este artículo propone los siguientes valores para las matrices de pesos:

$$U_1 = \rho_1 Q, \quad (15)$$

$$S_1 = \lambda_1 V_1^T C_1^T R_1 C_1 V_1, \quad (16)$$

$$T_1 = \lambda_1 (\bar{V}_1^T C_1^T R_1 C_1 \bar{V}_1 + D_1), \quad (17)$$

dónde $\rho_1 \in \mathbb{R}$ y $\lambda_1 \in \mathbb{R}$ son dos escalares que permiten fijar la relación entre las matrices de pesos y D_1 es una matriz en cuya diagonal se recoge la distancia entre el nodo 1 y el nodo que realiza la medida del estado correspondiente (2). Así, el diseño del observador se reduce a un problema en el cual solo es necesario fijar el valor de dos escalares para variar la calidad de estimación de la planta por los diferentes agentes.

El diseño de dichos escalares se ha fijado de tal manera que si son fijados con valor unidad, el diseño se lleva a cabo de una forma directamente proporcional a los parámetros de ruido y distancia al agente que realiza la medida del estado concerniente. Los parámetros permiten al usuario modificar esta proporcionalidad según su propia experiencia acerca del proceso.

5. Ejemplos de simulación

Con el fin de mostrar la robustez del algoritmo para el diseño del observador introducido se llevarán a cabo varias simulaciones. Para ello considere el siguiente sistema y matrices de salida:

$$A = \begin{bmatrix} 1,005 & 0 & 0 \\ 0 & 0,9954 & -0,08757 \\ 0 & 0,1248 & 0,9945 \end{bmatrix},$$

$$C_1 = [1 \ 0 \ 0], \quad C_2 = [0 \ 1 \ 0].$$

Los ruidos considerados son $Q = I_n \otimes 0,2$, $R_1 = 0,1$, $R_2 = 0,1$.

El sistema considerado cuenta con tres estados. El primero de ellos, x_1 es un estado con una dinámica inestable que se considera completamente desacoplado de los otros dos. Por otro lado, el segundo y tercer estados (x_2 y x_3) son una pareja de polos conjugados con una dinámica críticamente estable. El primer estado es observado por el primer agente mientras que el segundo observa el segundo y el tercero a través de las medidas de x_2 .

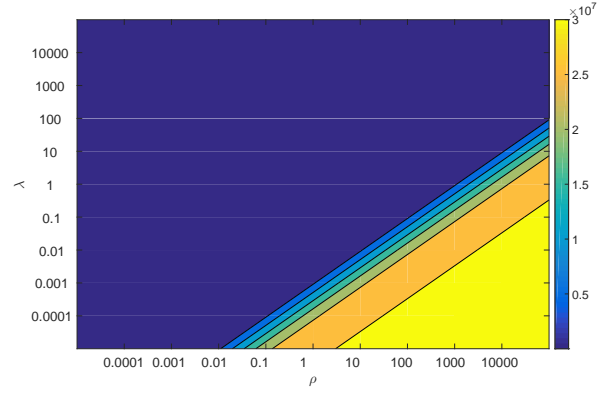


Figura 1: Efecto de los parámetros ρ y λ en el error de estimación.

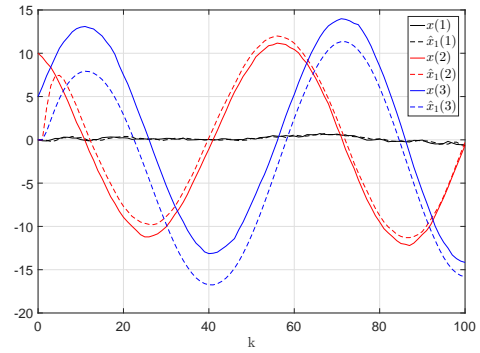


Figura 2: Evolución del estado y las estimaciones del agente 1 (en línea discontinuas).

En la Figura 1 se muestra el efecto que tiene el ajuste de los parámetros δ y λ en el error de estimación de ambos agentes. Para ello, se han llevado a cabo varias simulaciones considerando el mismo vector de ruidos y variando los valores de estos escalares. En la figura se representa la suma del error de estimación cuadrático de cada agente para un horizonte temporal de 100 instantes:

$$e_{ac} = \sum_{k=1}^{100} \sum_{i=1}^2 \|e_i(k)\|.$$

Observe que para un valor constante de λ al aumentar el valor de δ el error crece bruscamente. Es decir, cuando se penaliza en gran medida la exactitud del modelo respecto a las medidas tomadas la calidad de la estimación empeora en gran medida. Sin embargo, para los parámetros de diseño considerados ($\delta = 1$ y $\lambda = 1$) el error de estimación es bajo.

Por último, con el fin de mostrar la robustez del estimador en la Figura 2 se muestra la evolución del sistema y del estimador implementado en el agente 1 (en líneas discontinuas).

En la figura se puede observar que el error de estimación en el primer estado decrece rápidamente mientras que el segundo estado tiene una dinámica algo más lenta. Por último el tercer estado es el último en converger ya que el agente no toma medidas directamente de él, sino que obtiene información acerca de éste a través de las lecturas de x_2 .

6. Conclusiones

Este artículo muestra una novedosa forma de analizar el problema de la estimación distribuida de una planta por una red de agentes. Gracias a la descomposición del estado por cada uno de los agentes en los subespacios observable y no observable, cada uno de ellos es capaz de diseñar una ganancia independiente para la parte del estado de la cual obtiene información por sus propias medidas y la parte que obtiene a través de consenso con el otro agente.

La principal novedad introducida en el artículo es el diseño de las ganancias del estimador a través de un algoritmo basado en programación lineal cuadrática. Para la elección de las matrices de pesos referentes al algoritmo basado en LQ se propone un diseño proporcional a las perturbaciones del sistema multiplicado por dos parámetros escalares. Dichos parámetros pueden ser ajustados por el usuario en función de su experiencia con el proceso, no siendo necesario conocimientos de control para ello.

Agradecimientos

Trabajo parcialmente financiado por AEI / FEDER (DPI-75294-CS-2-R, TEC2016-80242-P) y por el MCyT (DPI2013-44135-R).

Referencias

- [1] P. Millán A.R. del Nozal, L. Orihuela. Distributed consensus-based kalman filtering considering subspace decomposition. In *20th IFAC World Congress*, Toulouse, France, July 2017.
- [2] Gilles L. et al. Distributed kalman filtering compared to fourier domain preconditioned conjugate gradient for laser guide star tomography on extremely large telescopes. *Journal of the Optical Society of America*, 30(5):898–909, 2013.
- [3] P. Millán et al. Distributed implementation and design for state estimation. In *20th IFAC World Congress*, Toulouse, France, July 2017.
- [4] Hanly S.V. Ng B.L., Evans J.S. and Aktas D. Distributed downlink beamforming with

cooperative base stations. *IEEE Transactions on Information Theory*, 54(12):5491–5499, 2008.

- [5] R. Olfati-Saber. Distributed Kalman filtering for sensor networks. In *46th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 5492–5498, New Orleans, LA, USA, December 2007.
- [6] R. Olfati-Saber. Kalman-consensus filter: Optimality, stability, and performance. In *48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference*, pages 7036–7042, Shanghai, P.R. China, December 2009.
- [7] Chen S.Y. Kalman filter for robot vision: a survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(11):4409–4420, 2012.
- [8] V. Ugrinovskii. Distributed robust filtering with H_∞ consensus of estimates. *Automatica*, 47(1):1–13, 2011.
- [9] V. Ugrinovskii. Distributed robust estimation over randomly switching networks using H_∞ consensus. *Automatica*, 49(1):160–168, 2013.
- [10] Ugrinovskii V. Allgöwer F. Wu J., Li L. Distributed filter design for cooperative h-infinity-type estimation. *IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, pages 1373–1378, 2015.

Estimación de fugas en un sistema industrial real mediante modelado por señales aditivas

Ester Sales-Setién, David Tena, Ignacio Peñarrocha
Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño
Universitat Jaume I, Castellón, España
{esales,david.tenatena,ipenarro}@uji.es

Resumen

Este trabajo aborda el problema de estimación de fugas en una red industrial real de tuberías y tanques. Para lograr este objetivo, se propone el uso de un modelo basado en el principio de conservación de la masa en el que se incluyen las fugas como señales aditivas. A continuación, se plantean observadores tipo PI para la estimación de estas fugas. El trabajo incluye un análisis de las prestaciones del observador en relación a la estimación de las fugas y al diagnóstico de las mismas. También se estudia el efecto del comportamiento no Gaussiano del ruido que afecta a las mediciones reales.

Palabras clave: Fugas, aplicación industrial, estimación, diagnóstico de fallos, observadores PI.

1. Introducción

Las redes de tuberías y tanques representan importantes activos en la industria de procesos. Con independencia del esfuerzo dedicado al diseño y construcción de estas redes, las tuberías son propensas a sufrir fugas debido a la corrosión, la erosión o defectos de materiales entre otros. En muchos casos, el daño causado por las fugas se extiende más allá de los costes monetarios ya que las pérdidas de producto pueden ser peligrosas para los seres humanos y el medio ambiente. Así, la comunidad científica ha dedicado mucho esfuerzo al estudio de este problema. Los trabajos pioneros en el campo versaban sobre la rehabilitación y el replazamiento de tuberías, ver [1]. En las últimas décadas, sin embargo, las técnicas de detección de fugas han acaparado más atención, ver [2].

La clasificación incluida en [3] divide las técnicas de detección de fugas en dos grandes grupos. En primer lugar, existen las técnicas directas o externas, las cuales requieren el uso de hardware especializado como sensores ópticos o de inspección del suelo. En segundo lugar, se tienen las técnicas indirectas o internas que no requieren el uso de sensores especializados y se basan en la información proporcionada por las mediciones del proceso. Entre ellas, [4] distingue entre las estrategias que

se basan en el principio de conservación de la masa y los métodos que usan modelos analíticos de la dinámica del fluido en el interior de la tubería. Muchas contribuciones como [5] trabajan con estos métodos para la identificación de fugas; sin embargo, estas estrategias están basadas en complejos modelos que, la mayoría de las veces, son muy difíciles de calibrar y requieren de personal especializado para su gestión, [6]. Además, muchas redes industriales no están provistas de transductores de presión y la aplicación de estas estrategias resulta imposible. Por su parte, los métodos basados en el principio de conservación de la masa, como los presentados en [7], son fáciles de usar y pueden ser implementados fácilmente ya que utilizan mediciones proporcionadas por instrumentación presente en toda red industrial, [8].

En la bibliografía encontramos múltiples trabajos que usan técnicas de identificación basadas en observadores para la detección de fugas, por ejemplo [9]. A excepción de contadas contribuciones, i.e. [10], la mayoría de estos trabajos no usan datos reales y, en muchos casos, se asumen condiciones ideales de ruido. Los autores de [11] señalan la necesidad de estudios más detallados y comprensibles que permitan mejorar la efectividad y factibilidad del diagnóstico de fugas en redes de ambientes industriales. El principal objetivo de este trabajo es la aplicación de estimadores de fugas a una red industrial real de tanques y tuberías. Se utilizarán técnicas aditivas basadas en modelo que trabajan con el principio de conservación de la masa.

La organización de este trabajo es la siguiente. Primero, se establece el problema en la Sección 2, donde se incluye el modelo de la red de tanques y tuberías con sus sensores. En la Sección 3, se añaden las fugas al modelo anterior y se presentan observadores tipo PI (Proporcional-Integral) para la estimación de las mismas. En la Sección 4, se estudia la aplicación de técnicas de diagnóstico de fallos basadas en las señales de fuga estimadas. Finalmente, en la Sección 5, aplicamos la metodología propuesta a una red industrial real y, en la Sección 6, resumimos las principales conclusiones

2. Descripción del problema

Considérese un conjunto de $i = \{1, \dots, n_v\}$ tanques de almacenamiento de fluidos interconectados a través de una red de $j = \{1, \dots, n_q\}$ tuberías. Para modelar esta red, se propone la aplicación del balance de masas a cada uno de los tanques i de la red, i.e.,

$$\dot{M}_i = \sum_{j=1}^{n_q} c_{i,j} m_j, \quad (1)$$

donde m_j es el caudal másico transportado por la tubería j , \dot{M}_i es la derivada de la masa de fluido contenido en el tanque i y $c_{i,j}$ es una constante que describe la relación entre el caudal de la tubería j y la variación experimentada por el tanque i . Así, $c_{i,j} = 0$ si la tubería no está conectada al tanque y $c_{i,j} = \{-1, 1\}$ dependiendo de si la tubería extrae o inyecta fluido en él.

Debido al elevado coste de los caudalímetros másicos como los medidores de Coriolis, los caudales másicos no se miden, en general, con estos instrumentos en la industria. Por el contrario, es mucho más común encontrar caudalímetros volumétricos magnéticos o de diferencial de presión. Éstos se calibran con una densidad predefinida del producto, ρ_j^0 , dando el siguiente caudal másico:

$$m_j^0 = \rho_j^0 m_j. \quad (2)$$

Las condiciones ambientales, entre otros, pueden afectar a la densidad del producto por lo que la densidad real del producto, ρ_j , no cumple más la relación $\rho_j = \rho_j^0$. Así, modelamos, los caudales másicos proporcionados por los sensores volumétricos, denotados con u_j , como

$$u_j = m_j + \eta_j, \quad (3)$$

donde η_j no solo tiene en cuenta los ruidos de medida sino que también considera el sesgo que se producen por la diferencia entre la densidad de referencia del producto, ρ_j^0 , y la densidad real, ρ_j , i.e. $m_j - m_j^0$.

Lo mismo se aplica a la masa del fluido contenido en los tanques. En la industria, la masa se calcula a partir de las medidas proporcionadas por sensores de nivel, las dimensiones del tanque y la densidad de referencia del producto, ρ_j^0 , i.e.

$$M_i^0 = \rho_i^0 S_i h_i, \quad (4)$$

con S_i la sección equivalente del tanque i y h_i la altura equivalente medida por los sensores. De nuevo, modelamos las medidas másicas, a las que llamamos s_i , como

$$s_i = M_i + \nu_i, \quad (5)$$

donde ν_i recoge los ruidos de medida, los sesgos de densidad y la incertidumbre en las dimensiones del tanque.

La red anterior puede quedar afectada por fugas en sus tuberías, las cuales corromperían el sistema. Si tiene lugar una fuga, la ecuación (1) no se cumple más. En la siguiente sección mostramos como modificar la relación (1) para que ésta tenga en cuenta las posibles fugas en las tuberías.

El objetivo principal de este trabajo es proporcionar un algoritmo de estimación de fugas que utilice la información proporcionada por las mediciones u_j y s_i . También se tratará de caracterizar las prestaciones de este estimador para construir un diagnosticador de fallos que diferencie entre la presencia y ausencia de fugas en el sistema. En la literatura de diagnóstico de fallos, es común considerar que los ruidos que afectan a las mediciones son Gaussianos. Las mediciones reales, sin embargo, suelen estar afectadas por desviaciones no Gaussianas como sesgos, i.e. (3) y (5). Otras discrepancias con respecto a esta suposición derivan de otras causas como el uso de filtros en sensores inteligentes o temas de cuantización, que dependen de la resolución digital. Con todo, en el trabajo se tratará de discutir cuán críticos son estos comportamientos para el diagnóstico de fallos.

Se desea que los algoritmos de este trabajo se puedan implementar en hardware industrial como PLCs o Sistemas de Control Distribuido. Por ello, a lo largo del artículo, se trabajará en el espacio discreto con un periodo de muestro T_s . También se estudiará el efecto de este periodo de muestro en la no Gaussianidad de los ruidos que afectan a las mediciones.

3. Estimación de Fugas

3.1. Modelado Aditivo de las Fugas

Para tener en cuenta las posibles fugas en la red de tanques y tuberías, la ecuación (1) puede ser rescrita como

$$\dot{M}_i = \sum_{j=1}^{n_q} c_{i,j} (m_j + l_{i,j}), \quad (6)$$

donde $l_{i,j}$ representa el caudal másico fugado en la tubería j conectada al tanque i . De acuerdo con lo expuesto en [12], para que las señales de fallo sean identificables, éstas deben ser también detectables e aislables. Un fallo es detectable si sus variaciones afectan a las salidas medibles del sistema. Así, un fallo de fuga $l_{i,j}$ es detectable con M_i si $c_{i,j} \neq 0$. Por otra parte, un fallo aditivo como $l_{i,j}$ solo es aislable si el número total de fallos que puede afectar al sistema no es superior al número de salidas medibles. Dado que una única medida de salida

M_i está disponible por tanque, solo se puede llegar a estimar el caudal másico total fugado en el conjunto de las tuberías conectadas a cada tanque i , i.e

$$M_i = \sum_{j=1}^{n_q} c_{i,j} m_j + f_i, \quad (7)$$

con $f_i = \sum_{l=1}^{n_q} c_{i,j} l_{i,j}$. Finalmente, definimos la función de transferencia entre un fallo f_i y la salida del sistema como $G_{f_i}(s)$. Para que un fallo f_i sea identificable se necesita que la inversa de $G_{f_i}(s)$ sea estable y causal. Como la salida del sistema es M_i , tenemos que $G_{f_i}^{-1}(s) = s$, lo que significa que f_i no es identificable a partir de M_i . Para solucionar este problema, proponemos utilizar la derivada de M_i , que denotamos como \dot{M}_i , como salida del sistema; así, $G_{f_i}^{-1}(s) = 1$, i.e. f_i es identificable a partir de \dot{M}_i . La discretización del modelo del sistema que permite la estimación de las fugas es

$$y_i[k] = E_i u[k] + E_i \eta[k] + \mu_i[k] + f_i[k], \quad (8)$$

con

$$\begin{aligned} E_i &= [c_{i,1} \quad \dots \quad c_{i,n_q}], \\ u[k] &= [u_1[k] \quad \dots \quad u_{n_q}[k]]^T, \\ \eta[k] &= [-\eta_1[k] \quad \dots \quad -\eta_{n_q}[k]]^T, \end{aligned}$$

y donde $\mu_i[k]$ es el ruido de la nueva medición de salida $y_i[k]$, i.e.

$$y_i[k] = \frac{1}{T_s} (s_i[k] - s_i[k-1]), \quad (9)$$

$$\mu_i[k] = \frac{1}{T_s} (\nu_i[k] - \nu_i[k-1]). \quad (10)$$

3.2. Algoritmo de Estimación

Para favorecer la precisión del estimador en estado estacionario, proponemos el uso de observadores tipo PI. Así, modelamos la dinámica de los fallos f_i de (8) como

$$f_i[k+1] = f_i[k] + \Delta f_i[k], \quad (11)$$

donde $\Delta f_i[k]$ representa la variación de las señales de fallo f_i entre dos instantes consecutivos. La ecuación (11) permite modelar, por ejemplo, señales tipo escalón ($\Delta f_i[k]$ sólo tiene un valor no nulo en el momento de aparición del fallo) o señales tipo rampa ($\Delta f_i[k]$ toma un valor constante). Este tipo de modelo de fallos ha sido extensamente utilizado en la bibliografía para analizar el comportamiento de detectores de fallos, ver [13, 14].

El observador PI propuesto para la estimación del fallo f_i , que denotamos como \hat{f}_i , es

$$\hat{f}_i[k+1] = \hat{f}_i[k] + l_i(y_i[k] - \hat{f}_i[k] - E_i u[k]), \quad (12)$$

donde l_i es la ganancia que actualiza las predicciones obtenidas del modelo con las mediciones.

3.3. Diseño Basado en Prestaciones

Primero, definamos el error de estimación del fallo como

$$\tilde{f}_i[k] = f_i[k] - \hat{f}_i[k]. \quad (13)$$

Su dinámica viene dada por

$$\begin{aligned} \tilde{f}_i[k+1] &= (1 - l_i) \tilde{f}_i[k] + \Delta f_i[k] - \\ &\quad l_i (E_i v_i[k] + \mu_i[k]). \end{aligned} \quad (14)$$

De (14) se deduce que l_i fija los polos de la dinámica de \tilde{f}_i . Para un sistema de primer orden, una medida estandarizada para la caracterización de la velocidad de respuesta es la constante de tiempo τ_i definida como

$$\tau_i = -T_s / \ln(1 - l_i). \quad (15)$$

Esta constante fija, entre otros, el tiempo de establecimiento al 98 % frente a fallos escalón como $t_{s,98\%} = 4\tau$. También podemos utilizar otros índices como el Error Cuadrático Acumulado (ISE, del inglés *Integral Squared Error*) del error que, cuando ocurre un fallo tipo escalón, viene dado por

$$\text{ISE}_i = T_s (1 - (1 - l_i)^2). \quad (16)$$

Segundo, denominamos a la varianza del error $\tilde{f}_i[k]$ como σ_i^2 . Para calcular σ_i^2 debemos tener en cuenta la correlación entre $\nu_i[k]$ y $\nu_i[k-1]$ dentro de $\mu_i[k]$, ver (10). Así, en estado estacionario y cuando ningún fallo está presente en el sistema, σ_i^2 satisface la siguiente ecuación de Lyapunov:

$$\mathcal{F}_i = A_i \mathcal{F}_i A_i^T + B_i \mathcal{V}_i B_i^T, \quad (17a)$$

$$\sigma_i^2 = R \mathcal{F}_i R^T, \quad (17b)$$

con $R = [1 \quad 0]$,

$$A_i = \begin{bmatrix} l_i/T_s & 1 - l_i \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_i = \begin{bmatrix} -l_i E_i & -l_i/T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

y \mathcal{V}_i la covarianza del vector $v_i[k] = [\eta[k] \quad \nu_i[k]]$, i.e. $\mathcal{V}_i = \mathbf{E}\{v_i[k] v_i^T[k]\}$. La matriz \mathcal{F}_i da la varianza del vector $[f_i[k]^T \quad \nu_i[k]^T]^T$.

Las ecuaciones (15)-(16) y (17) muestran que hay un compromiso entre la habilidad de seguimiento del estimador y la precisión de las estimaciones. Para diseñar el estimador de fallos, se puede fijar el comportamiento temporal de las estimaciones con (15) o (16) y obtener la precisión de las estimaciones con (17) o seguir el procedimiento inverso, i.e., fijar la precisión con (17) y caracterizar la habilidad de seguimiento con (15)-(16).

4. Diagnóstico de Fallos

Dadas las características del estimador presentado anteriormente en (12), proponemos usarlo para el diagnóstico de fugas. Así, se introduce la siguiente decisión

$$\begin{cases} \text{if } |\hat{f}_i[k]| \geq f_{m,i} & \text{Fuga } f_i \\ \text{otherwise} & \text{No fuga } f_i \end{cases} \quad (18)$$

donde $f_{m,i}$ denota el mínimo fallo diagnosticable f_i , es decir, $f_{m,i}$ es el valor constante de fallo que hace saltar la alarma de fallo f_i si se tiene en cuenta que no hay otros fallos ni ruidos en el sistema.

$$f_{m,i} = \left\{ |f_i[k]| : \begin{array}{l} f_i[k] = f_i[k-1], \forall k \\ \lim_{k \rightarrow \infty} |\hat{f}_i[k]| \geq f_{m,i} \end{array} \right\}. \quad (19)$$

Se define ahora el ratio de falsas alarmas (FAR, del inglés *False Alarm Rate*), que denotamos con ϕ_i , como la probabilidad de hacer saltar una falsa alarma, es decir,

$$\phi_i = \mathbf{Pr}\{|\hat{f}_i[k]| \geq f_{m,i} : f_i[k] = 0\}. \quad (20)$$

Si asumimos que los ruidos que afectan al sistema son Gaussianos, tenemos que el error de estimación asociado a cada estimación del fallo, $\tilde{f}_i[k]$, tiene una distribución normal de media cero. Entonces, $f_{m,i}$ debería satisfacer la siguiente relación para garantizar cierto FAR:

$$f_{m,i} = \Phi^{-1}(1 - \phi_i/2) \sigma_i, \quad (21)$$

donde Φ^{-1} es la inversa de la función de densidad de una variable aleatoria normal. Esto significa que el mínimo fallo diagnosticable puede verse también como el cuantil utilizado para construir el intervalo de confianza de nivel $1 - \phi(i)/2$.

Nota 1 Si los ruidos tienen sesgo, debemos incrementar el umbral $f_{m,i}$ en una cantidad igual a $\sum_j |F_{i,j}| \bar{v}_{i,j}$ donde $F_{i,j}$ es la ganancia estática del ruido del sensor $v_{i,j}$ al fallo estimado \hat{f}_i , y $\bar{v}_{i,j}$ es el sesgo en el sensor $v_{i,j}$.

5. Aplicación

Considérese la red mostrada en la Figura 1. Hay un tanque de almacenamiento de materia prima conectado a un tanque de alimentación. Se denota la masa en esos tanques como M_1 y M_2 . La máxima capacidad de los tanques es, respectivamente, 10000 y 800 toneladas métricas. Estos tanques se conectan a través de una tubería que proporciona un caudal másico m_1 de hasta 25 t/h ($c_{1,1} = -1$ y $c_{2,1} = 1$). El tanque de alimentación tiene dos consumidores, cuyos caudales másicos se denotan como m_2 y m_3 ($c_{2,2} = c_{2,3} = -1$). Estos caudales

másico son de hasta 15 y 10 t/h respectivamente. Todas las tuberías pueden sufrir una fuga (i.e., las fugas $l_{1,1}$ y $l_{2,1/2/3}$). En este análisis, nos enfocamos en la detección de la fuga $l_{2,1}$ ya que, en realidad, esta tubería es la más larga y la menos accesible para los operarios. Aplicamos la técnica de estimación de fallo en dos situaciones, una con datos simulados y otra con datos reales de industria en los que hemos añadido una fuga simulada. Para $T_s = 1$, las señales reales necesarias para la

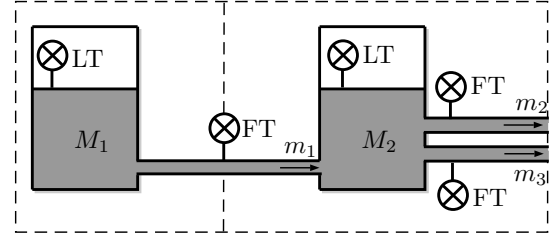


Figura 1: Arquitectura de la red de tanques, tuberías y transductores.

estimación son las que se muestran en la Figura 2. La Figura 3 muestra que la cuantización en las mediciones $s[k]$ afecta a $y_2[k]$ cuando se calcula con $T_s=1$ s; su ruido está correlado. Si se utiliza $T_s=20$ s, la correlación desaparece con el coste de un retardo mínimo en la detección de 20 segundos. Este retardo es despreciable para el caso de estudio; por lo tanto, elegimos $T_s = 20$ s para la implementación. En este caso, la desviación estándar del ruido de medición de $y_2[k]$ es 79,2 t/h. En el peor de los casos, la desviación estándar de cada uno de los sensores $u_1[k]$, $u_2[k]$ y $u_3[k]$ es 0,053 t/h, 0,0026 t/h y 0,022 t/h, respectivamente. Vemos que el reto principal del problema reside en la diferencia del orden de magnitud del ruido entre las mediciones del tanque y las que vienen de las tuberías.

Se han diseñado diferentes observadores para el estimador (12) con diferentes constantes de tiempo τ_2 desde 20 min a 180 min y con diferentes FARs ($\phi(1) = 10^{-3}$, $\phi(2) = 10^{-6}$ y $\phi(3) = 10^{-9}$). La parte superior de la Figura 4 muestra el mínimo fallo detectable que corresponde a cada diseño. Se ve que para un FAR dado, el mínimo fallo detectable $f_{m,2}$ disminuye cuando se incrementa la constante de tiempo del estimador. Conseguir gran sensibilidad a los fallos (es decir, un $f_{m,2}$ pequeño) requiere una mayor constante de tiempo del estimador si uno quiere asegurar a su vez ratios de falsas alarmas pequeños.

Bajo la presencia de un fallo f_2 tipo escalón, la estimación $\hat{f}_2[k]$ se comporta como un sistema de primer orden con constante de tiempo τ_2 y ganancia unitaria. Esto nos permite obtener el instante de tiempo en el que la estimación del fallo cruza

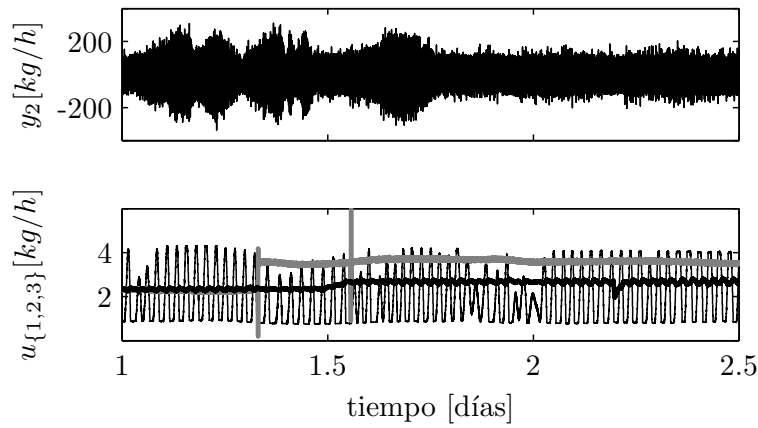


Figura 2: Entradas y salidas reales del tanque 2, $T_s = 1$.

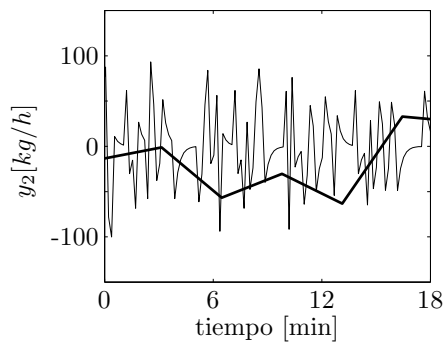


Figura 3: Detalle de la medición real y_2 para periodos de muestreo diferentes. (Claro: $T_s = 1$, Oscuro: $T_s = 20$)

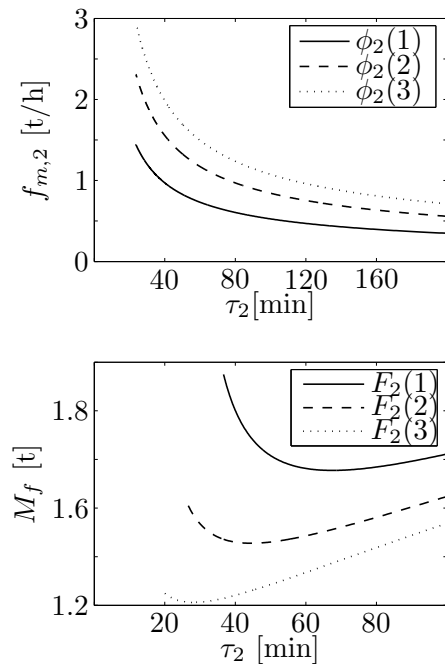


Figura 4: Compromiso de prestaciones para diferentes diseños.

el umbral y, por lo tanto, la cantidad de masa que se ha perdido hasta la detección:

$$M_f = -F \tau \log\left(1 - \frac{f_m}{F}\right).$$

La parte inferior de la Figura 4 se representa esta masa para diferentes estimadores (con las constantes de tiempo indicadas en el eje horizontal, y con $\text{FAR}=10^{-3}$) bajo tres fallos escalón de tamaños $F_2(1) = 2$ t/h, $F_2(2) = 3$ t/h, y $F_2(3) = 5$ t/h. Dado un detector definido por τ_2 y $f_{m,2}$, es remarkable que una fuga mayor F_2 hace que el tiempo de detección ocurra más rápido de forma que se pierde menos masa durante la fuga. La masa fugada es infinita si el fallo F_2 es menor que el umbral $f_{m,2}$, y alcanza un mínimo para cierto τ_2 . Como el fallo no se conoce a priori, esta característica no puede utilizarse para encontrar un detector óptimo (en el sentido de encontrar el detector que asegura una masa fugada mínima hasta la detección).

Para probar la bondad del enfoque, hemos alimentado el algoritmo (12) con datos reales para detectar fallos en el tanque 2. Hemos añadido una señal en forma de escalón de 3 t/h desde el instante 5h en las mediciones de m_1 , lo que representa una pérdida de esa cantidad en la tubería que va desde el caudalímetro hasta el tanque 2. Hemos probado el enfoque para diferentes diseños con tres valores diferentes de $f_{m,2}$ y para un valor fijo de FAR de 10^{-3} . El comportamiento del estimador y se puede ver en la Figura 5 (en oscuro). Se observa que en los periodos libres de fallo iniciales, la estimación tiene un pequeño sesgo debido a la densidad considerada en los caudalímetros, tal y como se explica en la ecuación (3). También se ha considerado datos simulados a partir de la generación de señales de caudal y obteniendo el volumen por integración, añadiendo también ruidos Gaussianos con la mayor varianza observada en los datos reales. En este caso, se tiene una estimación sin sesgo en los

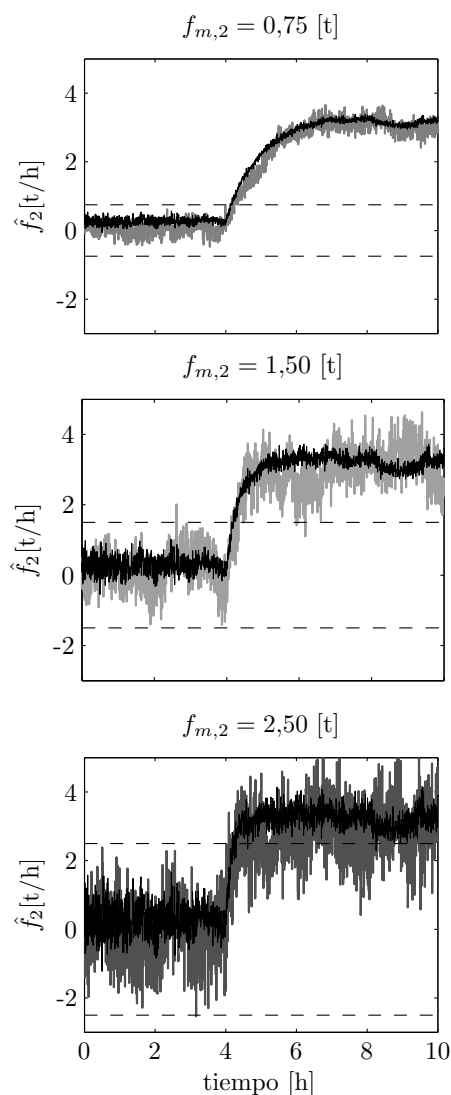


Figura 5: Comparación de las estimaciones y diagnóstico de diferentes diseños. (Oscuro: Datos industriales, Claro: Datos simulados.)

periodos libres de fallo que satisface con precisión el FAR diseñado.

6. Conclusión

En este trabajo se ha analizado el problema de la detección de fugas en redes de tuberías y tanques industriales, cuya masa y caudales se miden con sensores ruidosos. Se ha descrito y modelado el problema y se ha propuesto una estrategia de estimación. La estrategia modela las fugas como fallos aditivos y se propone el uso de un observador PI para su estimación. Este enfoque no requiere ninguna excitación específica para las señales y se pueden caracterizar las prestaciones obtenidas a pesar del nivel elevado de ruido de las señales disponibles. Estas prestaciones se han caracterizado por medio de los fallos mínimos diagnosticables,

el ratio de falsas alarmas, y el ratio de convergencia ante fallos tipo escalón. Se ha mostrado la relación entre estos tres índices de desempeño para el ruido disponible en datos industriales reales. Finalmente, se ha simulado la presencia de fugas perturbando las mediciones en los caudalímetros y se ha estudiado su comportamiento. Se ha demostrado la validez del enfoque para fugas en tuberías que rodean cierto tanque.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Universitat Jaume I de Castelló a través del proyecto con referencia P11B2015-42 2 y por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto con referencia TEC2015-69155-R. También se ha financiado a través de la ayuda predocctoral FPU14/01592 del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Los autores quieren mostrar su agradecimiento a UBE Corporation Europe, S.A.U. por su colaboración al compartir los datos industriales utilizados en el caso de estudio.

Referencias

- [1] Boulos, Paul y Tom Altman: *A graph-theoretic approach to explicit nonlinear pipe network optimization*. Applied Mathematical Modelling, 15(9):459–466, 1991.
- [2] Poulakis, Z, Dimitris Valougeorgis y Costas Papadimitriou: *Leakage detection in water pipe networks using a Bayesian probabilistic framework*. Probabilistic Engineering Mechanics, 18(4):315–327, 2003.
- [3] Geiger, Gerhard, Thomas Werner y Drago Matko: *Leak detection and locating - a survey*. En *PSIG Annual Meeting*. Pipeline Simulation Interest Group, 2003.
- [4] Murvay, Pal Stefan y Ioan Silea: *A survey on gas leak detection and localization techniques*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 25(6):966–973, 2012.
- [5] Verde, Cristina: *Accommodation of multi-leak location in a pipeline*. Control Engineering Practice, 13(8):1071–1078, 2005.
- [6] Sun, Liang: *Mathematical modeling of the flow in a pipeline with a leak*. Mathematics and Computers in Simulation, 82(11):2253–2267, 2012.
- [7] Andersen, Johannes H y Roger S Powell: *Implicit state-estimation technique for water network monitoring*. Urban Water, 2(2):123–130, 2000.

- [8] Doorhy, James: *Real-time pipeline leak detection and location using volume balancing*. Pipeline & Gas Journal, 238(2):65–66, 2011.
- [9] Torres, Lizeth, Cristina Verde, Gildas Besançon y Omar González: *High-gain observers for leak location in subterranean pipelines of liquefied petroleum gas*. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 24(6):1127–1141, 2014.
- [10] Reddy, H Prashanth, Shankar Narasimhan, S Murty Bhallamudi y S Bairagi: *Leak detection in gas pipeline networks using an efficient state estimator. Part II. Experimental and field evaluation*. Computers & Chemical Engineering, 35(4):662–670, 2011.
- [11] Yin, Shen, Steven X Ding, Xiaochen Xie y Hao Luo: *A review on basic data-driven approaches for industrial process monitoring*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61(11):6418–6428, 2014.
- [12] Ding, Steven X: *Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [13] Khedher, Atef, Kamel Benothman, Didier Maquin y Mohamed Benrejeb: *State and sensor faults estimation via a proportional integral observer*. En *6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, 2009.*, páginas 1–6. IEEE, 2009.
- [14] Koenig, Damien: *Unknown input proportional multiple-integral observer design for linear descriptor systems: application to state and fault estimation*. IEEE Transactions on Automatic Control, 50(2):212–217, 2005.

ADVANCED CONTROL BASED ON MPC IDEAS FOR OFFSHORE HYDROGEN PRODUCTION

Álvaro Serna

Department of Systems Engineering and Automatic Control, University of Valladolid, Valladolid, Spain.
alvaro.serna@autom.uva.es

Fernando Tadeo

Department of Systems Engineering and Automatic Control, University of Valladolid, Valladolid, Spain.
fernando@autom.uva.es

Julio Elías Normey-Rico

Automation and Systems Department, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, Brazil.
julio.normey@ufsc.br

Summary

The article deals with the design of a Model Predictive Control strategy in an offshore platform located in the Atlantic Ocean that produces hydrogen from the energy of the wind and the waves. This renewable energy is the energy source that feeds a set of electrolyzers which produce hydrogen, taking into account the energy available and optimizing the operation of the plant. The results of the simulation are presented, showing the correct operation of the platform under the proposed control.

Keywords: Hydrogen; renewable energy; model predictive control.

1 INTRODUCTION

This paper evaluates the design of an Energy Management System for Hydrogen production (EMS_H) using advanced algorithms based on Model Predictive Control (MPC) ideas to balance the consumption of power by electrolysis units in an offshore platform, with the aim of maximizing hydrogen production.

This approach is more advanced than previous EMS_H defined for the H2OCEAN plant [1,2] as it takes into account a cost function which optimizes the operation of the electrolysis plant. We focus here only in the hydrogen production numerically but taking into account the reduction of the number of connection/disconnections (in order to improve the state of health of the electrolyzers). Moreover, the proposed approach makes possible for system operator to know in advance the expected production and, therefore, schedule preventive-predictive maintenance operations on the electrolyzer units.

For simplicity, in this paper renewable hydrogen is locally generated by wind turbines and wave energy

converters and it is fully used (no storage or external sources are considered), but the results can be easily extended to the most common situation of using only the excess of energy from renewable sources [3].

The EMS_H developed in this paper follows a smart grid approach for the local micro grid [4]. In comparison with previous works [2], this proposal focuses on using an advanced control system to optimize hydrogen production and improves the operation of the appliances.

The energy generated at the platform by wind and waves is balanced by regulating the operating point of each electrolysis unit and its connections or disconnections, using a MPC. The term MPC does not designate a specific control strategy, but a very ample range of control methods which make an explicit use of a model of the process to obtain the control signal by minimizing an objective function [5].

The MPC presented in this paper is based on a Mixed-Integer-Quadratic-Programming (MIQP) algorithm which makes it possible to take into account predictions of available power and power consumption, improving the balance and reducing the number of connections and disconnections of the devices. Furthermore, a non-linear model with binary and continuous variables is developed in this paper, which is then transformed in such a way that an MIQP can be used to solve the MPC optimization at each step.

A case study is presented in this paper composed of wave and wind energies feeding a set of electrolyzers. The class of electrolyzers considered in this work are high-pressure and temperature alkaline electrolyzers, as they generate hydrogen with a purity better than 99.97%, which is the quality used in the automotive industry [6], and are already available at the power levels that make the technology cost-efficient (about MW). This work is organized in the following manner: Section 2 gives an overall description of the process and the variables that will

be used in the MCP. Section 3 deals with the control proposal and the optimization problem, whereas Section 4 shows a case study proposed in a certain location showing the adequate operations of the proposed EMS_H. Finally Section 5 gives some conclusions.

2 MATERIAL AND METHOD

This work falls within the innovative idea that consists of hydrogen offshore production by a combination of renewable energies. This paper focuses on the design of an advanced control algorithm of the H2OCEAN platform based on MPC ideas.

2.1 PROCESS DESCRIPTION

Fig. 1 depicts the components of the proposed renewable hydrogen platform: two renewable energy sources (wave and wind) supply electricity to the process. This electricity is generated in a WEC (Wave Energy Converter) coupled to a VAWT (Vertical Axes Wind Turbine) from a hybrid device, and is used in the electrolyzers as scheduled by the EMS_H that will be described in Section 3. An electrolyzer is a piece of electrochemical apparatus (something that uses electricity and chemistry at the same time) designed to perform electrolysis: splitting a solution into the atoms from which it is made by passing electricity through it [7]. The proposed EMS_H is aimed at adapting the production of hydrogen to the available energy using degrees of freedom of the advanced control system, so the hydrogen produced is maximized without degrading the electrolyzers.

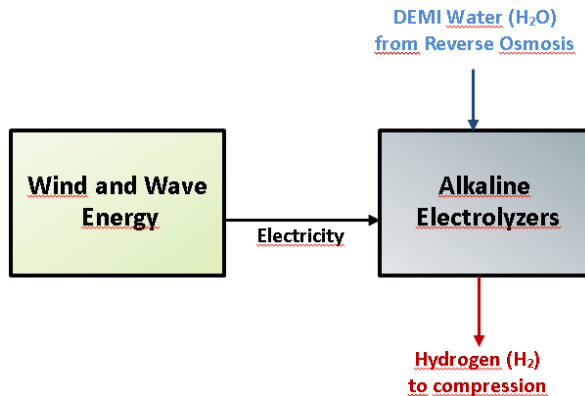


Figure 1: Block structure of the renewable hydrogen platform.

2.2 MANIPULATED AND CONTROLLED VARIABLES

The manipulated variables of the proposed EMS_H are the operating points for each electrolyzer, known as capacity factors. They are mathematically denoted by $\alpha_i(k)$, where k represents the discrete time in samples

(a sample time of 1 hour is used) and the suffix i is used to identify each device. Moreover:

- $\alpha_i(k) = 0$ if the electrolyzer i is disconnected at time k .
- $\alpha_i(k)$ is between $[\underline{\alpha}_i \ \bar{\alpha}_i]$ if the electrolyzer is connected, where $\underline{\alpha}_i$ and $\bar{\alpha}_i$ are minimum and maximum values (between 0 and 1) fixed by the manufacturer due to technological limitations.

In addition, binary variables $\delta_i(k) \in \{0,1\}$ are used where 0 corresponds to electrolyzer disconnection and 1 to electrolyzer connection [8].

The model of the electrolyzers is represented by the following equations with parameters a and b that are obtained from manufacturer's data and measurements from the plant:

$$\hat{H}_i(k) = \frac{\alpha_i(k) \cdot \delta_i(k)}{a_i \alpha_i(k) + b_i} \cdot \bar{P}_i \quad (1)$$

$$\hat{P}_i(k) = \bar{P}_i \cdot \hat{\alpha}_i(k) \cdot \hat{\delta}_i(k) \quad (2)$$

Equations (1) and (2) show the controlled variables of electrolyzer i : $\hat{P}_i(k)$ and $\hat{H}_i(k)$. On the one hand, $\hat{H}_i(k)$ is the predicted hydrogen production of electrolyzer i at time k . On the other hand, $\hat{P}_i(k)$ is the predicted energy consumption of device i whereas \bar{P}_i is its maximum power at the sample time. Parameters a_i , b_i and \bar{P}_i are used to define the device operation which gives the relationship between consumed energy and hydrogen production.

Fig. 2 depicts the controlled and manipulated variables for the electrolysis unit.

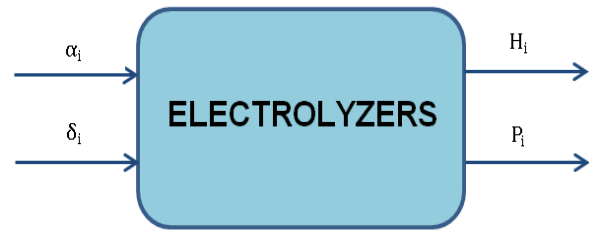


Figure 2: Scheme of the controlled and manipulated variables.

Note that the model of the electrolyzers used here is static because the time required for them to vary α from the minimum to the maximum value is less than a few minutes in the worst case, thus, these dynamics can be neglected as the sampling time for the EMS_H proposed here is one hour [9].

Fig. 3 shows the ratio H_i/P_i in the production of hydrogen by electrolysis as a function of the capacity factor (α) for the two types of electrolyzers considered which will be explained in the case study.

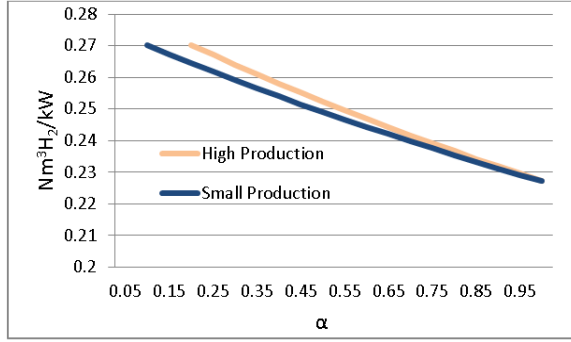


Figure 3: Ratio H_2 produced/Power consumed at different α ($a_1 = 0.875 \text{ kW/Nm}^3$, $b_1 = 0.875 \text{ kW/Nm}^3$, $a_2 = 0.778 \text{ kW/Nm}^3$, $b_2 = 3.625 \text{ kW/Nm}^3$)

2.3 MODEL PREDICTIVE CONTROL FOR HYDROGEN PRODUCTION

Comparing with other methods of process control, MPC can be used to solve the most common problems in today's industrial processes, which need to be operated under tight performance specification where many constraints need to be satisfied. The principal elements in MPC are the objective function to be minimized, the model used to compute the predictions of the controlled variables, the definition of the process constraints and the method applied to solve the optimization problem [10]. Fig. 4 shows the EMS_H based on MPC ideas, where the optimization block receives information from the model block (electrolysis plant), which is responsible for computing the predictions of the plant output in a defined horizon N .

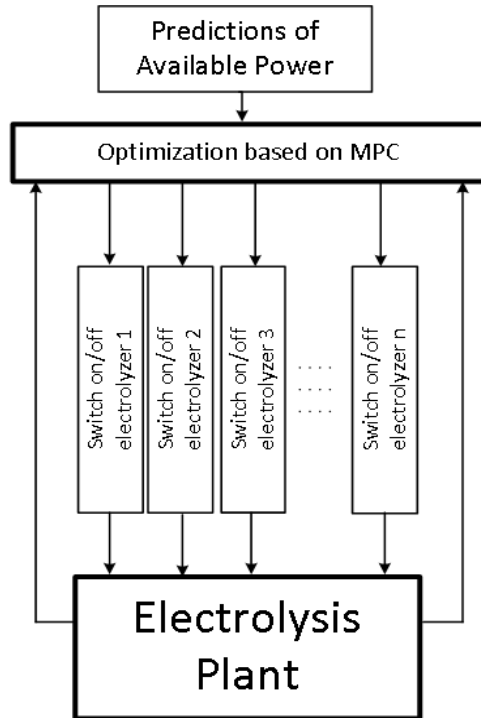


Figure 4: Proposed EMS_H based on MPC ideas.

A model which was depicted in equations (1) and (2) is used to predict the future outputs based on past and current values and on the proposed optimal future control actions. These actions are calculated by the optimizer taking into account the cost function (where the future tracking error is considered) as well as the constraints [10]. The MPC algorithm developed in this paper follows the Dynamic Matrix Control (DMC) method. It takes only into account the N_u horizon control first terms. Therefore assuming the process to be stable and without integrator. One of the characteristics of this method making it very popular in the industry is the addition of the constraints. Optimization (numerical because of the presence of constraints) is carried out at each sampling instant and the value of $u(t)$ is sent to the process. The inconveniences of this method are the size of process model required and also the inability to work with unstable processes [10].

3 CONTROL PROPOSAL

The control algorithm designed in this work aims to maximize the hydrogen produced by electrolysis considering different aspects, such as the limitation in the available power and the operational constraints. Three main objectives must be fulfilled:

O1: To maximize the hydrogen production, the difference between the values of the prediction and its desired values for each electrolyzer is minimized for all the devices along the prediction horizon (N).

O2: To maximize the operation of the devices, the discrete variables defining the connection or disconnection condition should be, whenever possible, equal to one (connection condition) along N .

O3: Energy consumed by the devices should always be smaller than the energy supplied from the wind and waves ($\hat{P}_{available}(k)$) but tries to be equal.

3.1 COST FUNCTION

Equation (3) shows the quadratic cost function considered in this work. It is solved in each sample time to maximize production, without excess connections/disconnections:

$$J = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N [(\hat{H}_i(k+j) - \bar{H}_i(k+j))^2 Q_{Hi} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_u} (\delta_i(k+j) - 1)^2 Q_{\delta i}] \quad (3)$$

This equation considers, in a prediction and control horizons of N and N_u samples respectively, the error between the predictions of hydrogen produced (\hat{H}_i) and its desired values (\bar{H}_i) while also penalizing the

number of connections and disconnections. Besides, Q_{H_i} and Q_{δ_i} are the weighting factors for the error and the control action, δ_i , respectively. The first term of (3) is used for **O1**, while the second term of this equation aims to achieve **O2**.

To solve this problem, the predictions of the hydrogen production are expressed as a function of the future control actions $\hat{\alpha}_i$ and $\hat{\delta}_i$, and the past values of these inputs and the outputs H_i and P_i . These predictions are obtained using the electrolyzer models (1) and (2). Thus, using (3) with all the system constraints and the electrolyzer models, It can be shown that the optimization problem to be solved at each sample time is (4), where the last constraint aims to solve **O3**.

$$\begin{aligned} \min_{(\alpha_i, \delta_i)} J \\ \text{s.t.} \quad \left\{ \begin{array}{l} \delta_i \in \{0, 1\} \\ \underline{\alpha}_i \leq \alpha_i \leq \bar{\alpha}_i \\ \hat{P}_i(k) = \bar{P}_i \cdot \hat{\alpha}_i(k) \cdot \hat{\delta}_i(k) \\ \hat{H}_i(k) = \frac{\hat{\alpha}_i(k) \cdot \hat{\delta}_i(k)}{a_i \cdot \hat{\alpha}_i(k) + b_i} \cdot \bar{P}_i \\ \sum_{i=1}^n \hat{P}_i(k) \leq \hat{P}_{\text{available}}(k) \end{array} \right. \quad (4) \end{aligned}$$

3.2 CONSTRAINTS

Constraints were included in (4). They are mathematically given by:

$$\alpha_i(k+j) \leq \bar{\alpha}_i \quad (5)$$

$$\alpha_i(k+j) \geq \underline{\alpha}_i \quad (6)$$

The following constraint (7) must be considered to fulfil **O3**: at each sample (k), the total energy consumed should always be smaller than the predicted available from the wind and waves $\hat{P}_{\text{available}}(k)$. Considering MPC ideas, the vector of predictions of available power, $\hat{P}_{\text{available}}(k)$, is calculated over N_u using real meteorological data. Hence, the constraint in the consumed energy is:

$$\sum_{i=1}^n \bar{P}_i \cdot \hat{\alpha}_i(k+j) \leq \hat{P}_{\text{available}}(k+j) \quad j = 1, 2, \dots, N_u \quad (7)$$

3.3 MPC STRATEGY

As it has been seen in Section 2.3, the MPC based on DMC ideas used in this advanced control algorithm includes a cost function (see Equation (4)) which considers, in a horizon of N samples, the error between the produced hydrogen \hat{H}_i and its desired

values (\bar{H}_i) and also the number of electrolyzers in operation ($\hat{\delta}_i$). J is solved at each sample time using receding horizon estimation.

With this, the optimization problem solved each sample time aims to optimize hydrogen production (\hat{H}_i) and minimizes the consumption \hat{P}_i .

For the H2OCEAN platform [1], the predictions are wave height, wave period and wind speed, but other different sources can be used of different proposal. Then, the future predictions of the output (hydrogen production, vector \hat{H}_i) are expressed as a function of the future control actions (vectors \hat{H}_i and \hat{H}_i) and the past values of the inputs and outputs. In the case of the electrolyzers modelled here, only a static model is considered. Thus a structure of the EMS_H control algorithm proposed in this paper is depicted in Fig. 5.

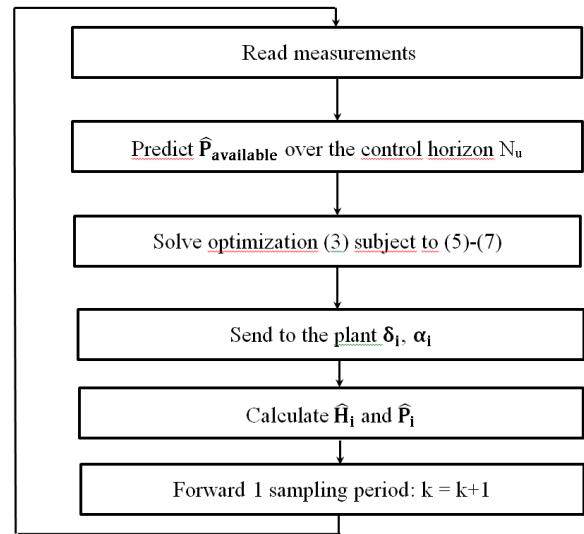


Figure 5: Structure of the EMS_H control algorithm

4 CASE STUDY

We now present the case study, which is a simulation of the platform with a perfect knowledge. The platform is made up of two different parts: one is the energy source and the other consumes the energy to generate hydrogen. To produce the energy for the renewable hydrogen plant, two sources (wind and waves) have been considered. Wind energy was chosen as it is a mature technology [11] and wave energy as it provides lower variability in the energy production [12]. A co-located hybrid device of 1 vertical axis wind turbine (VAWT) of 5.0 MW peak power and 1 wave energy converter (WEC) of 1.6 MW peak power were chosen according to the studies developed in the project H2OCEAN [1]. This hybrid VAWT-WEC device provides the energy: it consists of a platform with a hull (where the VAWT is located) and a cross bridge where four pitching wave energy converters are placed. The wave energy converters also reduce the motion of the platform and passively rotate it to face the waves.

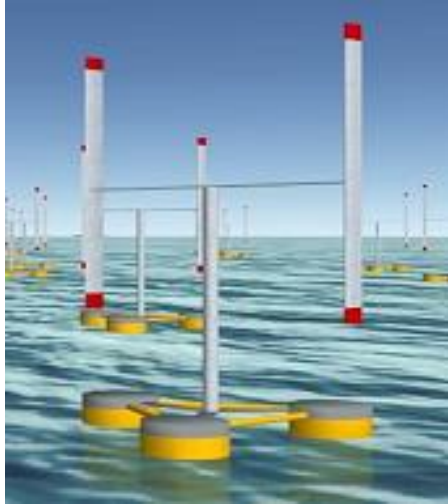


Figure 5: A co-located VAWT-WEC device [1]

To produce hydrogen, different NEL A485 electrolyzers were chosen. The main gas storage containers are located on two floating units, well separated from both the hydrogen production and each other. The alkaline electrolyzers operate slightly above ambient pressure and are further equipped with pressure relief equipment, to prevent overpressure operation.

4.1 RESULTS AND DISCUSSION

A simulation was carried out using one hybrid device of $5.0 + 1.6$ MW for the energy production. Meteorological data from a certain location in the Atlantic Ocean were used provided by Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Fig. 6 shows wave period predictions whereas Fig. 7 shows wave height predictions.

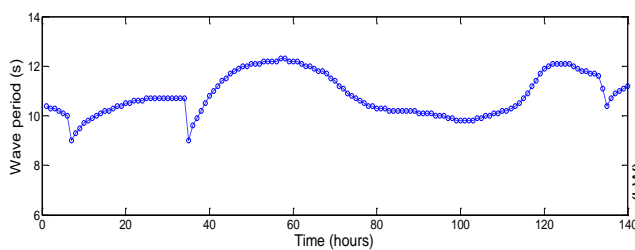


Figure 6: Meteorological wave period predictions.

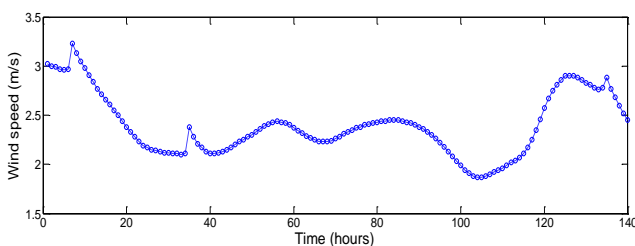


Figure 7: Meteorological wave height predictions.

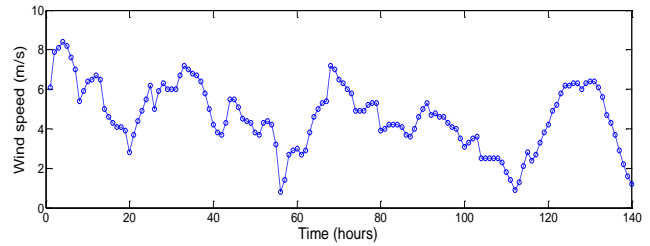


Figure 8: Meteorological wind speed predictions.

Three NEL electrolyzers (two high production of 2.134 MW rated and one small production of 0.220 MW rated) were chosen for this case study.

A control horizon of 3 hours, a prediction horizon of 3 hours and a sampling time of 1 hour were selected to validate de EMS_H . Thus, $n = 3$, $N_u = 3$ and $N = 3$. To optimize, and MIQP solver in the MATLAB[®] TOMLAB[®] was used. This optimization solver has been used for predictive control in different works [13, 14]. The available energy at each time k is different from the one predicted in the previous step.

For this case study, some results for 140 hours of operation are shown in Figs. 9 to 13. These results confirm the correct operation of the advanced control system designed in this paper.

Fig. 9 shows the power provided by the renewable energy sources (black line) and the power consumed (red line) by the electrolyzers. As it can be seen in the simulation, the controller maintains the consumed power very near the available one. As a consequence of this, the hydrogen produced is near the achievable maximum.

This happens because an ideal operation was supposed. It must be pointed out that perfect knowledge of the electrolyzers parameters are assumed and correspond to the manufacturer's data. In practice there are some tolerances and variations in parameters.

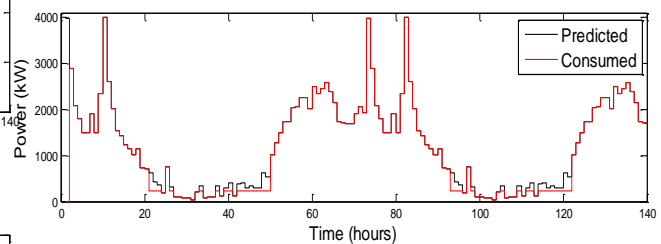


Figure 9: Power available and consumed.

Fig. 10 shows the operation of the electrolyzer $i = 1$ (high production). As expected, this device is not connected/disconnected very often by the proposed EMS_H and α_1 is always between the requested bounds $\bar{\alpha}_1$ and $\underline{\alpha}_1$.

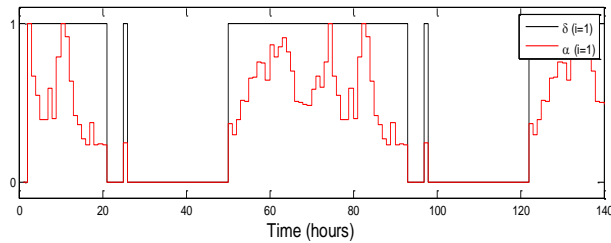
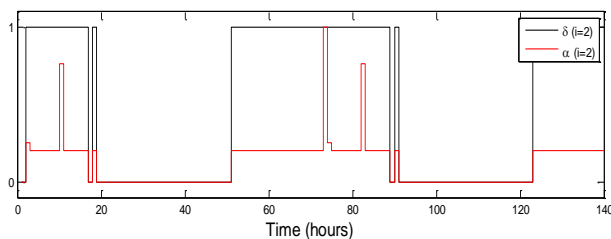
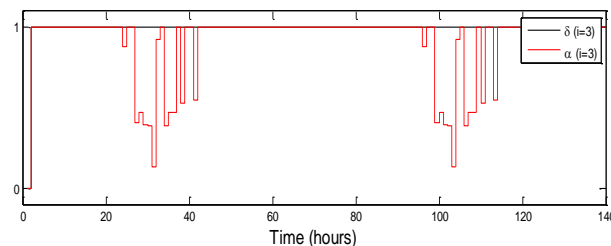
Figure 10: Operation of electrolyzer $i = 1$.

Fig. 11 shows the operation of the second high production electrolyzer ($i = 2$). This operation is different from the electrolyzer $i = 1$ because they have different weighting factors. Thus, here the capacity factor α_1 is almost always at the lower bound $\underline{\alpha}_2$. As it is not disconnected frequently, it can be considered that the control algorithm is well designed and tuned.

Figure 11: Operation of electrolyzer $i = 2$.

Electrolyzer $i = 3$ (Fig. 12) is more connected because its operation is bigger than the operation of the high production electrolyzers, therefore the operation of this device can also be considered correct. As in the other electrolyzers, the values of the manipulated variables are always between the defined bounds.

Figure 12: Operation of electrolyzer $i = 3$.

5 CONCLUSIONS

The main conclusions of this paper are the following:

- The Mixed-Integer-Quadratic-Programming for the MPC allows the capacity factor of each electrolysis unit and its connections or disconnections to be regulated.
- In the two case studies, the error between the predicted and the desired powers consumed by each electrolyzer is minimized for all devices along the prediction horizon N .

- The operation of the electrolysis set is maximized, since the discrete variables defining the connection/disconnection condition of the electrolysis is actioned along the prediction horizon, as much as possible.
- The MPC control strategy ensures the hydrogen production continuity, since the energy consumed by the electrolysis is almost equal to the energy supplied from the wind and waves during the prediction horizon.
- The electrolyzer's state of health is ensured, thanks to the minimization of the switching between the connection/disconnection states.

Acknowledgements

This work was partly supported by MiCInn DPI2014-5430-R and the European Comission (7th Framework Programme, grant agreement 288145, Ocean of Tomorrow Joint Call 2011). The author thanks the financial support given by Junta de Castilla y León (EDU/1083/2013). Also thanks to AEMET for providing meteorological data.

Prof. Normey-Rico thanks CNPq-Brazil for the financial support under projects 305785/2015-0 and 401126/2014-5.

References

- [1] H2ocean-project.eu, (2014). H2Ocean. [online] Disponible en: <http://www.h2ocean-project.eu/> [Visitado 6 June. 2017].
- [2] Serna, A., Tadeo, F., (2014) "Offshore hydrogen production from wave energy" *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 (3), 1549-1557.
- [3] Valverde, L., Bordons, F., Rosa, F., (2016) "Integration of fuel cell technologies in renewable-energy-based microgrids optimizing operational cost and durability" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(1), 167-177.
- [4] Serna, A., Yahyaoui, I., Normey-Rico, J. E., de Prada, C., Tadeo, F., (2017) "Offshore hydrogen production from wave energy" *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (17), 12865-12876.
- [5] Afram, A., Janabi-Sharifi, F., (2014) "Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control (MPC)" *Building and Environment*, 72, 343-355.
- [6] Aprea, J. L., (2014) "Quality specification and safety in hydrogen production, commercialization and utilization"

International Journal of Hydrogen Energy, 39 (16), 8604-8608.

- [7] Kong, Y. T., (2016) “An Analysis of the Recognition on Definition and Mechanism of Electrolysis for University Students Major in Science Education” *Journal of Applied Chemistry*, 12(3), 463-481.
- [8] Mendes, P. R., Maestre, J. M., Bordons, C., Normey-Rico, J. E., (2017) “A practical approach for hybrid distributed MPC” *Journal of process Control*, 55, 30-41.
- [9] Serna A., Normey-Rico J.E., Tadeo F., (2015) “Model predictive control of hydrogen production by renewable energy”. The 6th International Renewable Energy Congress IREC 2015. Sousse Tunisia.
- [10] Camacho, E. F., Bordons, C., (2013) “Model predictive control” *Springer Science and Business Media*.
- [11] Friebe, C. A., von Flotow, P., Täube, F. A., (2014) “Exploring technology diffusion in emerging markets-the role of public policy for wind energy” *Energy Policy*, 70, 217-226.
- [12] Vicinanza, D., Contestabile, P., Ferrante, V., (2013) “Wave energy potential in the north-west of Sardinia (Italy)” *Renewable Energy*, 50, 506-521.
- [13] Nandola, N. N., Rivera, D. E., (2013) “An improved formulation of hybrid model predictive control with application to production-inventory systems” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 21(1), 121-135.
- [14] Zhong, S., Zhang, Y., (2013) “How to select optimal gateway in multi-domain wireless networks: Alternative solutions without learning” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12(11), 5620-5630.

TRANSFER FUNCTION PARAMETERS ESTIMATION BY SYMMETRIC SEND-ON-DELTA SAMPLING

José Sánchez, María Guinaldo, Sebastián Dormido

Departamento de Informática y Automática, UNED, C/ Juan del Rosal 16, 28040 Madrid,
{jsanchez,mguinaldo,sdormido}@dia.uned.es

Antonio Visioli

Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Brescia, via Branze 38, 25123 Brescia,
antonio.visioli@unibs.it

Resumen

In this paper, a method to estimate the parameters of first and second order systems with time delays with different accuracy levels for autotuning of event-based PID controllers is presented. Information from the describing function of the non-linearity that introduces the event-based sampling strategy and measures of the oscillations are used to generate the estimations. The event-based sampling condition applied is based on the sampling strategy known as symmetric-send-on-delta.

Palabras clave: Describing function, event-based control, send-on-delta, estimation, limit cycle.

1 INTRODUCTION

During last years, studies on the application of the event-based paradigm to different control engineering fields have experimented a huge expansion both in printed publications and in conferences and workshops. From the first two publications in an international conference with an explicit mention to event-based control [1] and sampling [2] to these days, the event-based paradigm has been applied to PID control, predictive control, networked control, distributed control, agent-based systems, filtering, state estimation, sampling, etc. (see [11]). However, there is one specific field in control engineering in which the event-based paradigm has not been applied until now: parameter estimation of transfer functions. To find references on system identification that can be considered near or related to the event-based paradigm, it is necessary to look at works on autotuning based on relays, such as [8, 10, 13, 15].

As a relay is a static non-linearity, the common procedure in the frequency domain to analyze the behavior of a relay in a feedback loop is the describing function (DF). This method relies on the estimation of the amplitude (K_u) and frequency (ω_u) of the oscillations produced by a relay, which are approximations to the true values due to the truncated high order harmonics that the DF ap-

proach introduces even with no measurement errors.

The relationship between the describing function approach and the parameter estimation based on events is due to the fact that an event-based sampling can generate an oscillatory signal in the control loop. In the most basic architecture of an event-based feedback control loop, the sampling is done applying a Send-On-Delta (SOD) sampling strategy to the process output [12, 14]. When the output is quantified by a quantity multiple of δ , the relationship between the input and the output of the event sampling block is symmetric with respect to the origin. Then, this strategy is known as Symmetric-Send-On-Delta (SSOD) and can be seen also as a generalization of a biased relay [3] with its corresponding describing function.

The present paper provides an event-based parameter estimation approach for autotuning purposes of control loops using a SSOD block located at the process output. A first try on using the describing function approach to autotuning of event-based PI control loops was reported in [4]. In this work, the process (first order plus time delay, FOPTD for short) parameters are estimated considering a limit cycle of one level generated by the SSOD block and knowing at first one of the three FOPTD parameters. Also, the parameter estimation in an event-based control loop is considered in [5]. In such work, the estimation approach is based on curving fitting using a relay in series with the SSOD block and a pre-tuned PI controller. From measurements obtained of the oscillatory signals and using the controller parameter values, expressions to obtain the FOPDT parameters are given. In the new approach presented here, a previous tuning of the controller is not necessary and the method can be applied at the beginning of the design phase, as a previous step to the tuning. Like previous works based on DF, the model parameters need to be calculated using some previous information from the process (i.e., the static gain or the velocity gain in a process with integration), but no additional experiments are needed.

The rest of the paper is organized as follows. In Section 2, the structure of the control loop con-

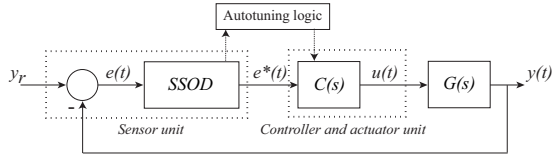


Figure 1: Event-based control loop where the estimation parameter approach is included as part of the autotuning logic.

sidered is described. In Section 3, the estimation approach based on the describing function of the SSOD block is presented. Section 4 outlines the procedure to identify the most usual models used for tuning of PID controllers. Examples of results are shown in Section 5. Finally, the discussion about the goodness of the proposed method is given in Section 6.

2 ARCHITECTURE

The event-based feedback control loop considered in this work is divided into three units (Figure 1): the sensor, the control, and the actuator. The sensor unit is composed of the sensor and its on-board intelligence, and it is on charge of computing the error $e(t) = y_r(t) - y(t)$. The event-based sampler takes the error $e(t)$ and produces an event-based signal $e^*(t)$ transmitted to the controller. The control unit $C(s)$ implements the control law that, without loss of generality, is considered to be PID. The actuator unit receives $u(t)$ from $C(s)$ and applies it to the process $G(s)$.

The autotuning logic block contains the programming code needed to apply the different steps of the estimation approach explained in this paper. So, during the identification phase, the logic would be in charge of deactivating the integral and derivative actions of the PID in Figure 1 and modify the proportional gain to produce the oscillations needed to estimate the parameters. At the same time, the logic would introduce changes in the reference y_r to disturb the process (for example, a step or a pulse). Once the event-based estimation phase concludes, the $C(s)$ would start working with the information received from the autotuning logic, being these data, for example, the three PID parameters derived from a set of tuning rules or directly the model parameters for the predictive controller.

In this paper, the event-based sampling is done applying a SSOD. Formally, a SOD sampler can be thought as a block which receives a continuous signal $e(t)$ as input and generates a sampled signal $e^*(t)$ as output, which is a piecewise constant signal with $e^*(t) = e(t_k), \forall t \in [t_k, t_{k+1})$. Each t_k is denoted as event time, and it holds

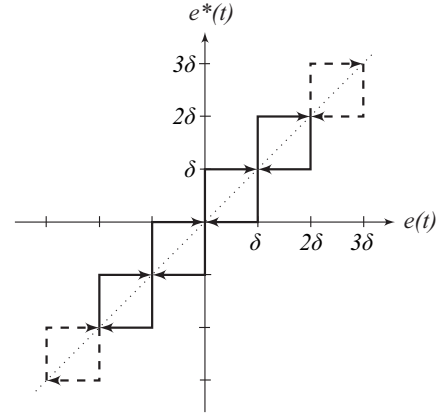


Figure 2: Relationship between $e(t)$ and $e^*(t)$.

that $t_{k+1} = \inf\{t \mid t > t_k, |e(t) - e(t_k)| \geq \delta\}$, where $\delta > 0$ is the sampling threshold. In the symmetric case (SSOD), the sampled output signal $e^*(t)$ can assume only values multiple of the threshold δ , and is mathematically described as follows:

$$e^*(t) = \begin{cases} (i+1)\delta & \text{if } e(t) \geq (i+1)\delta \wedge e^*(t^-) = i\delta \\ i\delta & \text{if } e(t) \in [(i-1)\delta, (i+1)\delta] \wedge e^*(t^-) = i\delta \\ (i-1)\delta & \text{if } e(t) \leq (i-1)\delta \wedge e^*(t^-) = i\delta \end{cases}$$

The key point of the relationship between $e(t)$ and $e^*(t)$ is that it can be considered as a generalization of a relay with hysteresis, where there is an infinite number of thresholds [9], as shown in Figure 2. This implies that a describing function of this non-linearity can be derived and applied to the analysis of the oscillations.

3 THE DESCRIBING FUNCTION APPROACH

The describing function of a SSOD block that produces a signal similar to Figure 2 is given by the following equation [6, 7]:

$$N(A, \delta) = \frac{2\delta}{\pi A} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{\delta m}{A}\right)^2} + 2 \sum_{k=1}^{m-1} \sqrt{1 - \left(\frac{\delta k}{A}\right)^2} \right] - j \frac{2}{\pi} \left(\frac{\delta}{A}\right)^2 m, \quad (1)$$

considering that the input is a sinusoidal signal of amplitude A . In (1), $m = \text{floor}(A/\delta)$ represents the amplitude of the oscillation reached by the signal $e(t)$. According to Figure 2, the output of the SSOD block is zero for inputs of amplitude $A < \delta$, so A must be equal or higher than δ in order to produce some output. For this reason, the quotient $\delta/A \in [0, 1]$ and can be considered as a normalized parameter δ_A . So, the DF expression of the SSOD block can be rewritten as

$$N(\delta_A) = \frac{2\delta_A}{\pi} \left[1 + \sqrt{1 - (\delta_A m)^2} + 2 \sum_{k=1}^{m-1} \sqrt{1 - (\delta_A k)^2} \right] - j \frac{2\delta_A^2}{\pi} m, \quad (2)$$

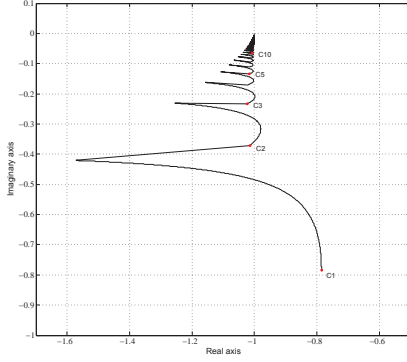


Figure 3: Nyquist plot of $-1/N(\delta_A)$. A C_i point corresponds to $\delta_A = 1/i$.

where $\delta_A \in [0, 1]$. The calculations of $N(A, \delta)$ are omitted for brevity.

The condition for the existence of limit cycles is given by [33]:

$$G_{ol}(j\omega) = -\frac{1}{N\delta_A}, \quad (3)$$

where $G_{ol}(j\omega) = C(j\omega)G(j\omega)$. In Figure 3, the portrait of $-1/N(\delta_A)$ is represented for $\delta_A \in [0, 1]$ and some particular points are illustrated. The intersection of $G_{ol}(j\omega)$ with a point C of $-1/N(\delta_A)$ is known as *intersection* or *critical point*. The subindex i in a C point means that its intersection with $G_{ol}(j\omega)$ produces theoretically an oscillation of amplitude $A = i\delta$, $i \geq 1$. As an oscillation of amplitude $A = i\delta$ with $i = 1, \dots, n$ means that $m = \lceil A/\delta \rceil = \lceil i\delta/\delta \rceil = i$, from (2) the expression to obtain the C_i corresponding to an oscillation of amplitude $i\delta$ is

$$C_i = \frac{-1}{\frac{2}{i\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{i-1} \sqrt{1 - \left(\frac{k}{i}\right)^2} \right] - j \frac{2}{i\pi}}. \quad (4)$$

In Figure 4.a, each arc segment of the SSOD represents a certain type of limit cycle. The first arc, starting in C_1 , represents possible limit cycles of amplitudes in the interval $[\delta, 2\delta)$ and corresponds to the triggering of events at crossing the $\pm\delta$ thresholds (Figure 4.b), the second arc represents possible limit cycles of amplitudes $[2\delta, 3\delta)$ generated at crossing the $\pm 2\delta$ thresholds (Figure 4.c), and so on (Figure 4.d). Two or more intersection in the Nyquist map means that the process can reach two or more depictions of different frequencies and amplitudes depending on the operation conditions. It is important to notice that $N(\delta_A = 0) = C_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} C_i = -1$, that means the intersection of $G_{ol}(j\omega)$ with C_∞ would produce a limit cycle of infinite amplitude, i.e., instability.

Applying a proportional gain $C(j\omega) = K_{osc}$ to a stable $G(j\omega)$, three possible cases can be generated:

- Case 1: $G_{ol}(j\omega) < -1$ and $G(j\omega) < -1/N(\delta_A)$. No oscillations at any frequency.
- Case 2: $G_{ol}(j\omega) < -1$ and $G(j\omega) = -1/N(\delta_A)$. Existence of oscillations at frequency ω_{osc} and amplitude given by the intersection point, that

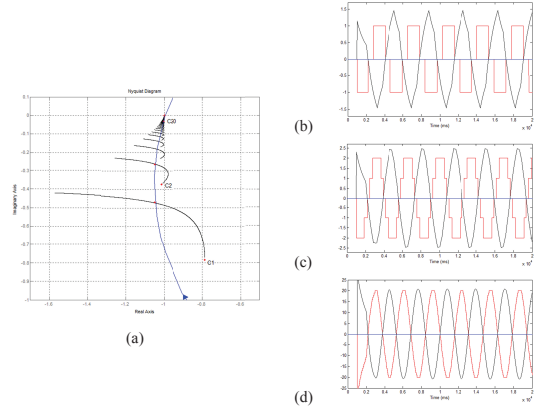


Figure 4: Graphical determination of the limit cycles of $G_{ol}(s) = 2.25e^{-s}/(s+1)$.

is, $A = \lceil 1/\delta_A \rceil$. There can be as many stable limit cycles as intersections.

- Case 3: $G_{ol}(j\omega) \geq -1$. Instability. However, depending of the operation or initial conditions of the process, the stable limit cycle can be reached avoiding the instability. Hence, for small perturbations, as the limit cycle is locally stable, it will converge to its original state with increasing time, avoiding the instability.

The event-based method for parameter estimation consists in applying a proportional gain K_{osc} to the unknown process $G(s)$ and forcing it to enter in a limit cycle of amplitude $i\delta$, $i \geq 1$. That means to move the process from Case 1 to Cases 2 or 3. The details of the approach will be given in the next section, but a further comment is required before. The value of C from the DF analysis is an approximation of the true value of the experimental oscillations denoted as C' . Higher accuracy in the estimation depends higher oscillations, but, at the same time, the sensibility of K_{osc} is higher.

4 THE PARAMETER ESTIMATION PROCEDURE

The transfer functions models used for PID autotuning and the equations derived for them are summarized in Table 1. We make the following assumptions: (i) the process is in steady state with the SSOD block centered in zero; (2) K_{osc} is set to 1.

The estimation procedure can be divided into the following steps:

1. Getting the oscillation parameters.
 - (a) To reach an stable oscillation of high order, i.e. $i > 5$, move out the process from the steady state introducing a square pulse of amplitude, for example, $y_r = y_{max_r}$ and increasing the K_{osc} gain.
 - (b) Once the oscillation is stable, annotate the gain K_{osc} , the amplitude of the oscillation

Table 1: Models used for PID autotuning. K , L , T , T_1 and T_2 are all positive constants.

Model	$\mathbf{G}(s)$	$ \mathbf{G}(s) $	$\angle \mathbf{G}(s)$
FOPTD	$\frac{Ke^{-Ls}}{Ts+1}$	$\frac{K}{\sqrt{1+\omega^2 T^2}}$	$-\omega L - \arctan \omega T$
SOPDT-1	$\frac{Ke^{-Ls}}{(Ts+1)^2}$	$\frac{K}{1+\omega^2 T^2}$	$-\omega L - 2 \arctan \omega T$
SOPDT-2	$\frac{Ke^{-Ls}}{(T_1 s+1)(T_2 s+1)}$	$\frac{K}{\sqrt{1+\omega^2 T_1^2} \sqrt{1+\omega^2 T_2^2}}$	$-\omega L - \arctan \omega T_1 - \arctan \omega T_2$

A_{osc} and the frequency ω_{osc} .

- (c) As the amplitude A of the oscillation will be not an integer number, calculate the crossing point C_{osc} using (1). In case of A is an integer number is also possible to use (4).
2. Estimation of steady-state gain by asymmetric oscillations.
 - (a) Add a bias d to the SSOD block output to produce a stable asymmetric oscillation.
 - (b) Repeat step 1a.
 - (c) Once the oscillation is stable, K becomes

$$K = \frac{\int_0^{2\pi} y(t) dt}{K_{osc} \int_0^{2\pi} e^*(t) dt}. \quad (5)$$

3. Estimate T using data from steps 1 and 2 according to Table 2.
4. Obtain L using T and the arguments of C_i according to Table 2.

5 SIMULATION EXAMPLES

Without loss of generality, the approach can be applied with oscillations of amplitude non-multiple of δ that means that (1) must be used to calculate C_{osc} instead of (4). In all the experiments, δ was set to 1 and the steady-state gain K was obtained by introducing a bias of $\delta = 0.5$ in the SSOD block and the approximations were exact.

5.1 Accuracy of the estimations

Table III illustrates the actual and process transfer function parameters obtained using information from the oscillations of amplitudes δ , 2δ and 3δ . The frequencies and gains of the current processes represent the points in which the processes intersect with the critical points C_1 , C_2 and C_3 in the Nyquist map. These points are approximations obtained from the DF, whereas the true values are obtained from experimental measures. Note that estimations using C_3 are very close to the actual processes, and the estimation error in any parameter is below the 2%.

Note that in the presented example of SOPDT two approaches are possible: 1) consider that there is a single pole with multiplicity equal to 2 and identify T , and 2) fix the value of T_1 and estimate T_2 . The application of the approach to the estimation of two different lags is complicated due to the discrepancies between theoretical and practical critical points, especially in the

frequencies, producing imaginary solutions in many situations.

Notice the non-causal model obtained in the last case in Table 3 with the lowest amplitude oscillation due to the discrepancies between the real ($\omega_1 = 0.304$) and the theoretical ($\omega_1 = 0.404$) oscillations frequency. As the order of oscillation increases, the discrepancy reduces and the estimation parameters converge to the real ones.

5.2 Comparative with other methods

Table 4 compares the actual and estimated process transfer functions for first order processes using the event-based and the ATV-2 approaches [8, 10]. Note that the estimations provided by ATV-2 are less accurate. However, since the AVT-2 assumes that the dead time can be observed from the initial response of the system to the relay tests, the delays of the ATV-based results are exact.

5.3 High-order processes

Table 4 presents the outcome of the event-based identification method when the process is modeled as FOPTD and SOPDT. With regard to the second case, the results for the SOPDT-1 are not so good due to the dominant lag as the estimation produces an average lag, that is, a critically damped system but, however the real process is overdamped. Applying the SOPDT-2 model when T_1 is provided, the estimated model can be now considered a good approach to the real one. Nyquist curves of the real processes and estimated transfer functions are presented in Figure 5.

5.4 Non-minimum phase processes

In this section, results of the estimation of FOPTD and SOPDT of non-minimum phase processes are presented in Table 6. The second case presented is compared with other method in the literature called *phase deviation* [15] in Figure 6. Note how this method presents a bad behavior at low frequencies that produces stationary error in contrast to the event-based method proposed in this paper.

6 DISCUSSION

In this paper, a simple event-based method to estimate the parameters of first and second order systems with time delays using SSOD sampling has been presented.

Table 2: Estimation of T and L .

Model	T	L
FOPTD	$\frac{\sqrt{K^2 K_{osc}^2 - C_{osc} ^2}}{ C_{osc} \omega_{osc}}$	$-\frac{\angle C_{osc} + \arctan \omega_{osc} T}{\omega_{osc}}$
SOPTD-1	$\frac{\sqrt{ C_{osc} (K K_{osc} - C_{osc})}}{ C_{osc} \omega_{osc}}$	$-\frac{\angle C_{osc} + 2 \arctan \omega_{osc} T}{\omega_{osc}}$
SOPTD-2	T_1 known $T_2 = \frac{ C_{osc} ^2 T_1 \omega_{osc}^2 - K^2 K_{osc}^2 + C_{osc} ^2}{ C_{osc} ^2 \omega_{osc}^2 (T_1 \omega_{osc}^2 + 1)}$	$-\frac{\angle C_{osc} + \arctan \omega_{osc} T_1 + \arctan \omega_{osc} T_2}{\omega_{osc}}$

Table 3: Comparative of the improvement of the estimations using information from three oscillations of different amplitude and frequency.

Nominal process	C₁	C₂	C₃
$\frac{e^{-s}}{s+1}$ $\omega_1 = 1.39, K_1 = 1.919$ $\omega_2 = 1.76, K_2 = 2.175$ $\omega_3 = 1.89, K_1 = 2.209$	$\frac{e^{-1.101s}}{0.782s+1}$ $\omega_1 = 1.425$ $K_1 = 1.59$ $A_1 = 1.006$	$\frac{e^{-0.998s}}{0.926s+1}$ $\omega_2 = 1.781$ $K_2 = 2.03$ $A_2 = 2.009$	$\frac{e^{-1.006s}}{0.998s+1}$ $\omega_3 = 1.843$ $K_3 = 2.14$ $A_3 = 3.02$
$\frac{e^{-s}}{(s+1)^2}$ $\omega_1 = 0.896, K_1 = 2.007$ $\omega_2 = 1.114, K_2 = 2.432$ $\omega_3 = 1.182, K_1 = 2.523$	$\frac{e^{-0.9965s}}{(0.930s+1)^2}$ $\omega_1 = 0.963$ $K_1 = 1.9$ $A_1 = 1.009$	$\frac{e^{-1.014s}}{(0.985s+1)^2}$ $\omega_2 = 1.127$ $K_2 = 2.311$ $A_2 = 2.038$	$\frac{e^{-1.006s}}{(0.995s+1)^2}$ $\omega_3 = 1.185$ $K_3 = 2.451$ $A_3 = 3.037$
	$\frac{e^{-1.074s}}{(s+1)(0.740s+1)}$	$\frac{e^{-1.014s}}{(s+1)(0.985s+1)}$	$\frac{e^{-1.006s}}{(s+1)(0.991s+1)}$

Table 4: Parameter estimation of FOPTD with different delays and time constants. The information used in the event-based method corresponds to oscillation of amplitude higher to 4δ .

Process	Event-based	ATV-2
$\frac{e^{-2s}}{s+1}$	$\frac{e^{-2.0066s}}{1.0002s+1}$ $A = 4.565, \omega_{osc} = 1.088,$ $K_{osc} = 1.856$	$\frac{0.89e^{-2s}}{0.761s+1}$
$\frac{e^{-5s}}{s+1}$	$\frac{e^{-5.002s}}{1.008s+1}$ $A = 6.4, \omega_{osc} = 0.5134,$ $K_{osc} = 1.15$	$\frac{0.833e^{-2s}}{0.728s+1}$
$\frac{e^{-2s}}{10s+1}$	$\frac{e^{-2.003s}}{9.977s+1}$ $A = 5.12, \omega_{osc} = 0.7859,$ $K_{osc} = 8$	$\frac{0.988e^{-2s}}{8.02s+1}$

The method is based on the information that the describing function of the SSOD sampling block provides about the point in which the process starts oscillating when the gain margin with respect to $-1/N(\delta_A)$ is reduced to zero by applying a proportional gain. The oscillation means the intersection of the process with a point of some arc segment of the SSOD describing function in the Nyquist loci. With the proportional gain applied to reach a stable oscillation, the frequency, the DF information on the intersection point, and the polar forms of the transfer functions of FOPTD and SOPTD, the steady-state gain, the time constants and time delays are obtained.

Comparing the results with other methods based on describing functions analysis of a relay, solutions are

Table 5: Examples of parameter estimation of high-order processes.

Process	FOPTD	SOPTD
$\frac{e^{-2s}}{(2s+1)^2}$	$A = 6.122, K_{osc} = 2.5, \omega_{osc} = 0.623$ $\frac{e^{-3.002s}}{3.755s+1}$	$\frac{e^{-2.008s}}{(1.994s+1)^2}$
$\frac{e^{-2s}}{(s+1)(10s+1)}$	$A = 8.164, K_{osc} = 6.76, \omega_{osc} = 0.572$ $\frac{e^{-2.869s}}{11.588s+1}$	$\frac{e^{-1.249s}}{(4.173s+1)^2}$ $\frac{e^{-1.9883s}}{(1.0197s+1)(9.9684s+1)}$
$\frac{e^{-0.2s}}{0.5s^2+1.5s+1}$	$A = 7.2, K_{osc} = 7.45, \omega_{osc} = 3.514$ $\frac{e^{-0.460s}}{2.080s+1}$	$\frac{e^{-0.1898s}}{(0.7188s+1)^2}$
$\frac{e^{-2s}}{(2s+1)^5}$	$A = 8.18, K_{osc} = 1.95, \omega_{osc} = 0.2749$ $\frac{e^{-7.407s}}{6.025s+1}$	$\frac{e^{-5.554s}}{(3.516s+1)^2}$

very accurate for non-measurement errors of the limit cycle waveform. The identification accuracy can be indeed high due to the use of oscillations that reduce the high-harmonic components of the limit cycle, especially for identifying higher-order or time delay processes of which the relay responses are apparently different from the sinusoidal shape.

Additionally, as other DF-related methods, the computational cost is low because applications of numerical methods to solve non-linear equations or costly experimental measures of high-order harmonics are not needed.

However, many questions and problems still remain open. One shortcoming of the method is that obtaining high-order oscillations can be sometimes difficult since depends on the historical operation of the pro-

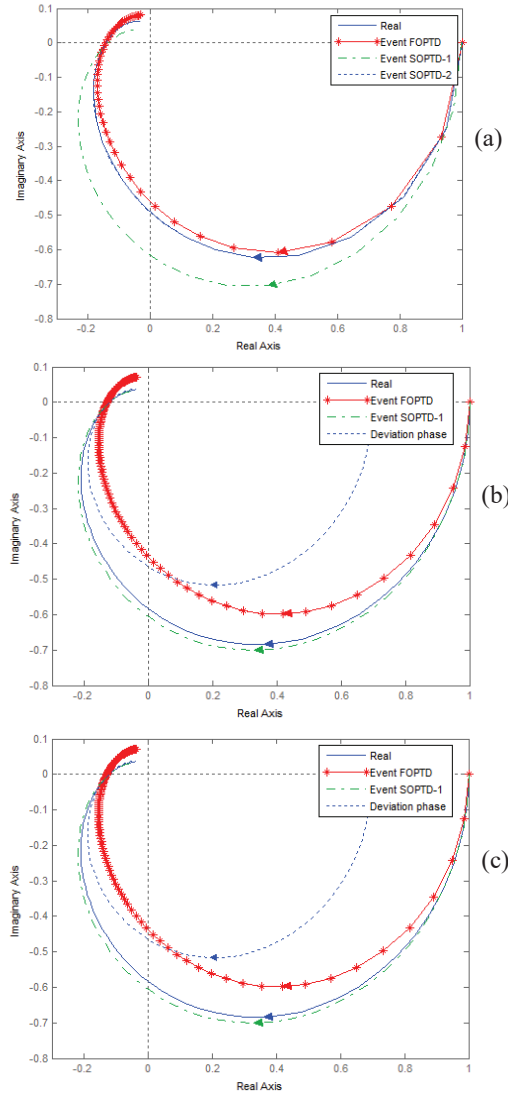


Figure 5: Nyquist curves of high-order processes and estimated models for three cases presented in Table 5. (a) $\frac{(1-s)e^{-2s}}{(s+1)(10s+1)}$, (b) $\frac{e^{-0.2s}}{0.5s^2+1.5s+1}$, (c) $\frac{e^{-2s}}{(2s+1)^5}$.

cess, not just on the gain. So, a constant increment of the proportional gain to reach higher oscillations can be translated into instability. Other issue to research is that the quantitative relationship between the C-point order used and the accuracy of the identification is not known. The study of processes with integrators will also be part of future studies. Furthermore, the sampling technique used for the estimation is vulnerable to the noise of the measurements. How the noise affects the parameter estimation is also an interesting problem to consider in the future.

Agradecimientos

This work has been funded by Spanish Ministry of Economy and Competitiveness under contracts DPI2012-31303 and DPI2014-55932-C2-2-R.

Table 6: Examples of parameter estimation of high-order processes.

Process	FOPTD	SOPTD
$\frac{(1-s)e^{-s}}{(s+1)^5}$	$A = 9.46, K_{osc} = 1.5, \omega_{osc} = 0.4648$ $\frac{e^{-4.838s}}{2.343s+1}$	$\frac{e^{-4.014s}}{(1.488s+1)^2}$
$\frac{(1-s)e^{-4s}}{(s+1)^4}$	$A = 7.09, K_{osc} = 1.19, \omega_{osc} = 0.3459$ $\frac{e^{-7.20s}}{1.813s+1}$	$\frac{e^{-6.499s}}{(1.228s+1)^2}$

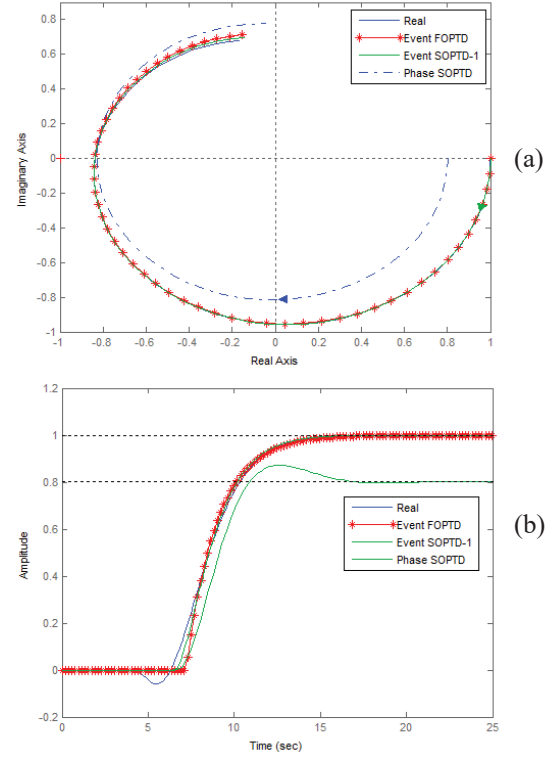


Figure 6: (a) Nyquist plots and (b) step responses for the second case in Table 6. The event-based method is compared with the strategy proposed in [15].

Referencias

- [1] K.E. Årzén, A Simple Event-Based PID Controller, 14th IFAC World Congress (1999), Beijing, China.
- [2] B. Bernhardsson, K.J. Åström, Comparison of periodic and event based sampling for first-order stochastic systems, 14th IFAC World Congress (1999), Beijing, China.
- [3] M. Beschi, S. Dormido, J. Sanchez, A. Visioli, Characterization of symmetric send-on-delta PI controllers, Journal of Process Control 22(10) (2012) 1930-1945.
- [4] M. Beschi, S. Dormido, J. Sanchez, A. Visioli, L.J. Yebra, Event-based PI plus feedforward control strategies for a distributed solar collector field, IEEE Transactions on Control Systems Technology 22(4) (2014) 1615-1622.

- [5] M. Beschi, S. Dormido, J. Sánchez, A. Visioli, Closed-loop automatic tuning technique for an event-based PI controller, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 54(24) (2015) 6362-6370.
- [6] S. Dormido, M. Mellado, Determination of limit cycles in adaptive sampling systems (In Spanish), *Revista de Automática* 26 (1975) 21-31.
- [7] S. Dormido, M. Mellado, A study on fixed-difference sampling scheme, *Applications and Research in Information Systems and Sciences* 2 (1977) 496-500.
- [8] I. Kaya, D.P. Atherton, Parameter estimation from relay autotuning with asymmetric limit cycle data, *Journal of Process Control* 11(4) (2001) 429-439.
- [9] E. Kofman, J. Braslavsky, Level crossing sampling in feedback stabilization under data rate constraints, *45th IEEE International Conference on Decision and Control* (2006), San Diego, USA.
- [10] W. Li, E. Eskinat, W.L. Luyben, An improved autotune identification method, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 30(7) (1991) 1530-1541.
- [11] M. Miskowicz (ed.), *Event-Based Control and Signal Processing*, CRC Press, 2015.
- [12] M. Miskowicz, Send-on-delta: An event-based data reporting strategy, *Sensors* 6 (2006) 49-63.
- [13] C. Scali, G. Marchetti, D. Semino, Relay with additional delay for identification and autotuning of completely unknown processes, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 38(5) (1999) 1987-1997.
- [14] V. Vasyutynskyy, K. Kabitzsh, Implementation of PID controller with send-on- delta sampling, *International Control Conference* (2006), Glasgow, Scotland, United Kingdom.
- [15] P. Wang, D. Gu, W. Zhang, Modified relay feedback identification based on describing function analysis, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 46(5) (2007) 1538-1546.

An Estimation Approach for Process Control based on Asymmetric Oscillations

José Sánchez Moreno, María Guinaldo Losada, Sebastián Dormido, José Luis Fernández Marrón
Departamento de Informática y Automática, UNED, C/ Juan del Rosal 16, 28040 Madrid
{jsanchez, mguinaldo, sdormido, jlmarron}@dia.uned.es

Antonio Visioli
Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Brescia, via Branze 38, 25123
Brescia, Italy {Antonio.visioli@unibs.it}

Abstract

An estimation procedure for process control has been developed based on the information obtained from the oscillations that a non-linear element as a simple relay introduces in the feedback loop. Features of the method are: (1) the procedure does not demand a priori process information, (b) non-iterative algorithms are needed to derive the process parameters, (c) only one test is needed, and (d) it allows identifying the process at a user-specified phase lag in the third quadrant. The method is presented for estimation of most common transfer functions found in chemical and process industry: integrators, first-, second- as well as processes with non-minimum-phase dynamics.

Keywords: Describing function, relay, estimation, limit cycle, oscillations.

1 Introduction

The main result presented in this paper is an enhanced estimation procedure based on a non-linear element as a relay. The proposed approach allows the identification of model parameters from measurements derived of the asymmetric oscillations generated by a relay and a bias added to the output. These measures are the oscillation frequency, the main harmonics, and the steady gain (if the process is without integration). The identification procedure is relevant for four reasons:

- (1) Unlike previous works based on relay-induced oscillations, the model parameters do not need to be calculated using a-priori information of the process (i.e., static gain, velocity gain, or dead-time),
- (2) Iterative methods to solve non-linear equations are not necessary,
- (3) The number of tests to obtain the measures is always one regardless the transfer function structure or order, and
- (4) The procedure can be extended to estimate any type of transfer function.

The structure of the paper is as follows. First, the basis of the estimation approach and the problems that have been detected in similar methods are described in Section 2. In Section 3, the procedure is explained and solutions to the problems found are given; also, expressions to estimate the parameters of common transfer functions are derived and simulation results are presented. Section 4 discusses a way to estimate with user-defined phase margin specifications. The paper finishes with conclusions and recommendations about the use of the procedure.

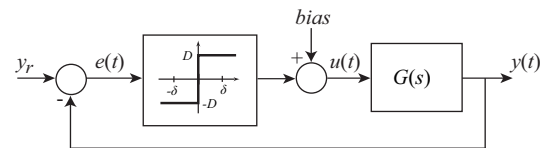


Figure 1: Basic relay feedback control loop.

2 Estimation based on relay-induced oscillations: basis and problems

The pioneering works on the use of relay feedback for identification purposes are from the 80's [1]. The basis of the method is that a linear system under an ideal relay control (Figure 1) oscillates, approximately, at its ultimate frequency, that is, $\omega_{osc} \approx \omega_u$ and the critical gain K_u is derived from the describing function (DF) of the ideal relay. That is,

$$N(A) = \frac{4D}{\pi A} = K_u \quad (1)$$

where A is the oscillation amplitude and D is the relay output. Knowing that the oscillation happens when the expression

$$\frac{-1}{N(A)} = G(j\omega_{osc}) \quad (2)$$

is satisfied, it is feasible to derive the parameters of a transfer function model. One way to do that it is to use the magnitude and argument of the critical point

$G(j\omega_{osc})$ in the Nyquist plot that corresponds to the intersection of $G(s)$ and $-1/N(A)$, separating both components to solve them. That is,

$$\left| \frac{-1}{N(A)} \right| = |G(j\omega_{osc})| \quad (3)$$

$$\arg \frac{-1}{N(A)} = \arg G(j\omega_{osc}) \quad (4)$$

To separate both parts is key to the estimation approach presented here. It is possible to apply iterative methods to solve directly (2), but when the transfer function to estimate has four or more unknowns (for example, K , T_1 , T_2 , and L), most of the time the iterative methods do not converge [7]. It is due primarily to the inaccuracy of the describing function and the extreme nonlinearity of the equations with respect to the parameters. However, by separating (2) in magnitude and argument, it is possible to solve (3) to get the zeros and poles, and (4) to obtain the time delay.

Following this approach, for estimating the parameters of a first order process with time delay $Ke^{-Ls}/(Ts+1)$, the following two equations are obtained

$$\frac{\pi A}{4D} = \frac{K}{\sqrt{1+(T\omega_{osc})^2}} \quad (5)$$

$$-\pi = -\arctan(T\omega_{osc}) - L\omega_{osc} \quad (6)$$

Once the steady gain K is known, it is possible to calculate first the lag T and next the time delay L (or observing L from the process response, T is first estimated and next K). However, the result will be an approximation as the critical gain and the phase lag of -180° are just approximations based on the principal harmonics of the relay output.

Example 1: The system

$$G(s) = \frac{e^{-s}}{s+1} \quad (7)$$

under relay feedback control with $D=1$ oscillates at $\omega_{osc} = 2.105$ with $A=0.6327$, $|G(j\omega_{osc})| = 0.4289$, and $\arg G(j\omega_{osc}) = -174.609^\circ$. However, the describing function theory says that

$$|G(j\omega_{osc})| = \frac{1}{K_u} = \frac{\pi A}{4D} = 0.4969 \quad (8)$$

and $\arg G(j\omega_{osc}) = -180^\circ$. Supposing that K is known, and using the information from the DF to estimate $G(s)$, it produces $T=0.8003$ and $L=1.9842$. Obviously, the estimation is not very accurate.

As the previous example confirms, authors report that the use of the describing function information can introduce errors in K_{-180° of 5%-20% [3]. For this reason, there has been a lot of research work to improve the information that the describing function provides and obtain additional critical points in the Nyquist plot at different phase margins to estimate transfer functions of order higher than one.

The first try in using the describing function for estimating different types of transfer function is found in [8] with the AutoTune Variation method (ATV). This method needs a priori process information obtained from inspecting its temporal response (the steady-state gain and the dead-time) and the oscillation frequency produced by an ideal relay in a test; with all these parameters, the method allows fitting five different transfer functions models. For each of these models, expressions of magnitude and argument are derived, that is, (3) and (4). As the method uses only the ultimate gain and the ultimate frequency from the test, that is, just one critical point, to get solutions for some models is difficult and, according to the author, “there is no guarantee that any of the models will fit the data”.

The Luyben's method [8] was improved by the ATV2 method [7] being only necessary to know the dead-time. In the ATV2 method, analytical expressions were obtained for the steady-state gain and time constants of transfer function models from first to third order. In this work, the estimation is afforded by working with (2) as the nonlinear part is eliminated because the dead-time is a known parameter. For each model, two equations are obtained by separating the real and imaginary parts of (2) but the number of unknowns is two, three of four, depending of the model's order. To obtain an additional critical point in the Nyquist plot, a known dead-time is added during a second test. In this way, four equations can be posed for each model and solved applying a linear least-square method. The bi-ATV method is introduced in [11]; the main difference with respect to the previous ones is the use of a biased-relay to obtain the steady-state gain from the experiment; the approach to solve the equations is similar to the original ATV. Another improvement, known as ATV+, was introduced in [10]; to avoid the prior knowledge of the dead time as in previous ATV versions, the ATV+ proposes to find an estimate of the delay through the determination of minimum and maximum bounds; using dead time values located inside the bounds, calculations for different candidate

models are repeated and, by analyzing the residual errors, the best model is then chosen. Other modification of the ATV2 method is described in [13] and better results are obtained but just in limiting cases. The approaches presented in [12] and [15] provide a simple procedure to estimate a FOPTD system with a single symmetrical relay but it has not being extended to higher order processes and an iterative method has to be applied to obtain the system parameters. Another method, known as phase deviation, is proposed in [16]; it obtains the parameters with only a relay test plus experimental measurements of the first-, third- and fifth-order harmonics of the process. Ideas of these last two references have been used in this paper. Recent contributions can be found in [9] and [6]; in both works, the information provided by the describing function is used to know the critical point and the dead-time is obtained by measuring the initial difference in the response of the process output with respect to the process input. More references related to identification based on the relay's describing function are [14] and [4]; the main contributions of these works is the design of the experiments for obtaining additional critical points at different frequencies to solve the equations.

After reviewing the literature on DF-based identification, the main problems found are summarized:

- The reciprocal of the DF provides an approximation of the Nyquist point at the frequency where the process oscillates. It is fundamental to obtain an exact value of $G(j\omega_{osc})$ during a test.
- In process without integration, it is necessary to obtain $G(0)$ as a first parameter. If the transfer function template to fit is exactly equal to the real process to identify, it is not necessary, as the identification will provide exact results at any frequency. However, if the true process has higher order or different structure to the template and $G(0)$ is not known, this will produce that the result is good around the critical frequency $\omega_{\approx -180^\circ}$ but with discrepancies at $\omega = 0$ (see Example 2). It is due to the fact that the template is fitted with lesser degrees of freedom than the true process. So, the fitting will be exact around ω_{osc} but will present discrepancies in frequencies close to zero.
- If the process has an integrator, as the identification is based on the behavior in the third quadrant, the results around $\omega_{\approx -180^\circ}$ will be good even when the transfer function has different structure than the real process. However, if the structure is different, the results will differ at low frequencies, improving the results if the identification is done at frequencies around ω_{-135° .

- It is necessary to design a procedure to get in just one test as many points of the Nyquist plane as unknowns $|G(s)|$ owns to solve the system of equations. One point will always be the oscillation point situated in the third quadrant of the Nyquist map. A second point must be $G(0)$ when needed depending of the template to fit.

- To be able of identifying at a user-defined phase lag. For example, recommendations on the margin phase of the Nyquist point to use in the identification depending of the process features are given in [4]. In [2], authors recommend estimating the process at ω_{-135° or ω_{-180° depending if PI or PID control is applied, respectively.

Example 2: An example of not taking into account $G(0)$ can be found in [16]. As the identification is done using a critical point close to ω_{-180° and

$G(s) = [(-s + 1)/(s + 1)^4]e^{-4s}$ is estimated using a second order model, the fitting is good enough around this Nyquist point but with an error in the steady-state gain of 24.6%. The estimated transfer function is $\hat{G}(s) = [1/(2.77s^2 + 2.28s + 1.24)]e^{-6.7s}$. This process is employed in the simulations as a study case (see Table II) and the results are improved with respect to [16].

3 The basis of the approach

As said before, the reciprocal of the relay DF is just an approximation and can introduce errors in the estimation. The solution adopted to get accurately $G(j\omega_{osc})$ during a test is presented in [15]. As $y(t)$ and $u(t)$ are periodic and piecewise, using the Laplace transform of both, it can be written

$$G(j\omega_{osc}) = \frac{Y(j\omega_{osc})}{U(j\omega_{osc})} = \frac{\int_0^{2\pi} y(t)e^{-j\omega_{osc}t} dt}{\int_0^{2\pi} u(t)e^{-j\omega_{osc}t} dt} \quad (9)$$

and following (9), and as indicated in [16], it is possible to obtain the harmonics

$$G(jn\omega_{osc}) = \frac{\int_0^{2\pi} y(t)e^{-jn\omega_{osc}t} dt}{\int_0^{2\pi} u(t)e^{-jn\omega_{osc}t} dt}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

Expression (10) lets solving two problems: (i) to get the value of $G(j\omega_{osc})$ that represents the exact point in the Nyquist plot where the intersection with $-1/N(A)$ is happening and, (ii) to obtain the additional points $G(jn\omega_{osc})$ needed in one test to work out the equations.

The last problem to solve is the estimation of the steady gain. Expression (9) cannot be applied as the oscillations produced by a relay are symmetric and the integration of the semi periods will be zero. However, if an asymmetry is introduced in the oscillations by adding a small bias to the relay output (see Figure 1), the process static gain can be derived from (9) [11] as

$$G(0) = \frac{\int_0^{2\pi} y(t)dt}{\int_0^{2\pi} u(t)dt} \quad (11)$$

It is important to notice that without bias, the signals are symmetric and even harmonics become zero.

3.1 Models

The identification procedure can be adapted to most of the process found in process industry just obtaining the magnitude and argument expressions of the transfer function to fit. Expressions for a first order plus time delay (FOPTD), an overdamped second-order with time delay (SOPTD-1), a second-order with time delay (SOPTD-2) to identify underdamped processes, and an integrating process with inverse response and time delay (IPIRTD) are given.

Model 1: FOPTD

$$G_1(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (12)$$

Model 2: SOPTD-1

$$G_2(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{(Ts + 1)^2} \quad (13)$$

Model 3: SOPTD-2

$$G_3(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{as^2 + bs + 1} \quad (14)$$

Model 4: IPIRTD

$$G_4(s) = \frac{K(1 - T_1s)e^{-Ls}}{s(T_2s + 1)} = \frac{(1 - T_1s)e^{-Ls}}{as^2 + bs} \quad (15)$$

where $K = 1/b$ and $T_2 = a/b$.

From each of these models, the expressions of magnitude and argument of $G(j\omega_{osc})$ are derived.

Model 1: FOPTD

$$|G_1(j\omega_{osc})| = \frac{K}{\sqrt{T^2\omega_{osc}^2 + 1}} \quad (16)$$

$$\arg G_1(j\omega_{osc}) = -\arctan(T\omega_{osc}) - \omega_{osc}L \quad (17)$$

where $\arg G_1(j\omega_{osc}) \in [-2\pi, 0]$.

As K , ω_{osc} and $G_1(j\omega_{osc})$ are obtained directly from the test using (10) and (11) by adding a bias, T can be obtained directly from (16). After that, L is derived from (17).

Model 2: SOPTD-1

$$|G_2(j\omega_{osc})| = \frac{K}{T^2\omega_{osc}^2 + 1} \quad (18)$$

$$\arg G_2(j\omega_{osc}) = -2\arctan(T\omega_{osc}) - \omega_{osc}L \quad (19)$$

The unknowns are the same that in the previous one, so the procedure to apply is the same.

Model 3: SOPTD-2

$$|G_3(j\omega_{osc})| = \frac{K}{\sqrt{a^2\omega_{osc}^4 + b^2\omega_{osc}^2 - 2a\omega_{osc}^2 + 1}} \quad (20)$$

$$\arg G_3(j\omega_{osc}) = \arctan(-b\omega_{osc}, -a\omega_{osc}^2 + 1) - \omega_{osc}L \quad (21)$$

There are three unknowns K , a , and b in (14). As K is obtained directly from the test using (11) by adding a bias, to get the other two unknowns is necessary the expression corresponding to the second harmonics, that is, $|G_3(j2\omega_{osc})|$. This expression is derived from (20) just replacing ω_{osc} by $2\omega_{osc}$ and its experimental value is obtained from the test (see (10)). Once a and b are known, the dead-time is derived from (21).

Model 4: IPIRTD

$$|G_4(j\omega_{osc})| = \sqrt{\frac{T_1^2\omega_{osc}^2 + 1}{\omega_{osc}^2(a^2\omega_{osc}^2 + b^2)}} \quad (22)$$

$$\arg G_4(j\omega_{osc}) = -\arctan\left(\frac{-(T_1a\omega_{osc}^2 - b)}{-\omega_{osc}(T_1b + a)}\right) - \omega_{osc}L \quad (23)$$

The unknowns in (22) are T_1 , a , and b . As it is a process with integration, the velocity gain can directly be obtained solving the system of equations. So, the expressions of $|G_4(j2\omega_{osc})|$ and $|G_4(j3\omega_{osc})|$ are needed and its experimental values are got from the test (see (10)). The dead-time is directly got from (23) once the other three unknowns are obtained.

The following expressions are the result of solving the previous equations for the four models. For the

sake of simplicity, C_n represents $|G(jn\omega_{osc})|$ and $\arg C_1$ corresponds to $\arg G(j\omega_{osc})$.

Model 1: FOPTD

$$T = \frac{\sqrt{K^2 - C_1^2}}{\omega_{osc} C_1} \quad (24)$$

$$L = -\frac{\arg C_1 + \arctan(\omega_{osc} T)}{\omega_{osc}} \quad (25)$$

Model 2: SOPTD-1

$$T = \frac{\sqrt{C_1(K - C_1)}}{\omega_{osc} C_1} \quad (26)$$

$$L = -\frac{2 \arctan(T \omega_{osc}) + \arg C_1}{\omega_{osc}} \quad (27)$$

Model 3: SOPTD-2

$$\begin{aligned} aux &= \sqrt{(3C_1^2 - 12C_2^2)K^2 + 9C_1^2 C_2^2} \\ a &= \frac{aux}{6\omega_{osc}^2 C_1 C_2} \end{aligned} \quad (28)$$

$$b = \frac{\sqrt{-3C_1^2 K^2 + 48C_2^2 K^2 - 45C_1^2 C_2^2 + 12C_1 C_2 aux}}{6\omega_{osc} C_1 C_2} \quad (29)$$

$$L = \frac{\arctan(-b\omega_{osc}, -a\omega_{osc}^2 + 1) - \arg C_1}{\omega_{osc}} \quad (30)$$

Model 4: IPIRTD

$$T_1 = \frac{1}{\omega_{osc}} \sqrt{\frac{C_1^2 C_2^2 - 6C_1^2 C_3^2 + 15C_2^2 C_3^2}{-9C_1^2 C_2^2 + 24C_1^2 C_3^2 - 15C_2^2 C_3^2}} \quad (31)$$

$$a = \frac{1}{\omega_{osc}^2} \sqrt{\frac{-5C_1^2 + 32C_2^2 - 27C_3^2}{-108C_1^2 C_2^2 + 288C_1^2 C_3^2 - 180C_2^2 C_3^2}} \quad (32)$$

$$b = \frac{1}{\omega_{osc}} \sqrt{\frac{5C_1^2 - 128C_2^2 + 243C_3^2}{-108C_1^2 C_2^2 + 288C_1^2 C_3^2 - 180C_2^2 C_3^2}} \quad (33)$$

$$L = -\frac{\arctan(-(T_1 a \omega_{osc}^2 - b), -\omega_{osc}(T_1 b + a)) + \arg C_1}{\omega_{osc}} \quad (34)$$

3.2. Outline of the procedure

The procedure is based on producing a limit cycle oscillating at ω_{osc} as consequence of the relay control actions generate when $G(s)$ crosses zero. As shown before, mathematically, the limit cycle is explained as the consequence of the intersection of

$G(s)$ with $-1/N(A)$ at ω_{osc} . The intersection point corresponds to the value of $G(j\omega_{osc})$.

The estimation procedure can be divided into the following steps:

1. Add a small bias, i.e., $\approx 0.1D$ to the relay output.
2. Once the oscillation is stable, annotate ω_{osc} , and the harmonics $G(jn\omega_{osc})$ needed to solve the equations. In models without integration, it is necessary K .
3. Use the expressions:
 - (24) and (25) for FOPTD model.
 - (26) and (27) for SOPTD-1 model.
 - (28), (29), and (30) for SOPTD-2 model.
 - (31), (32), (33), and (34) for IPIRTD model.

Remark 1: Model 3 lets detecting if the true process corresponds to a dynamics of first order instead of second order. In this case, the procedure will generate a value for a close to zero.

Remark 2: Model 2 and 3 can produce the same result if the true process corresponds to an overdamped second order system. In case of being underdamped (non-monotone), models 1 and 2 can produce a complex value for the time lag or an overdamped solution, and the correct results are produced only by Model 3.

3.3 Simulation examples

The simulations have been run in Matlab/Simulink with a sampling time $h=0.001$. The parameters used in the tests have been $D=1$ and $bias=0.1D$.

Table I shows the results when the structure of the true process and the model are the same. Models 2 and 3 produce similar solutions for Cases 2 and 3 as both real processes correspond to overdamped systems. However, in Case 4, model 2 produces complex values as the true process is underdamped. The identification in Case 5 provides a complex value for T_1 close to zero (0.08i) due to the numerical errors; and it is ignored and equated to zero.

Table II corresponds to the results when the structure of the true process is different to the transfer function to fit. Cases 7 and 8 correspond to the fitting of FOPTD models; cases 9, 10, and 11 to second order processes, and cases 12 and 13 to processes with integration and inverse response. In Case 9, it is not possible to present solutions for models 1 and 2 as the true process is an underdamped system (non-monotone). Case 10 corresponds to the process used in Example 2 but the steady gain is correctly

estimated (see Figure 2). Although the DF theory establishes that the oscillation produced by a simple relay happens with a phase lag of -180° , it must be noticed in the simulations how the phase margin changes for each process. The higher discrepancies happen in processes with non-minimum phase dynamics as the process output becomes less sinusoidal.

Table I: Solutions for processes with same order and structure than the transfer function fitted.

	Real process	Proposed method
1	$\frac{e^{-2s}}{10s+1}$	$\frac{1.003e^{-2.0008s}}{10.0364s+1}$ $\varphi_m \approx -0.78^\circ$
2	$\frac{e^{-2s}}{(2s+1)^2}$	$\frac{1.0003e^{-2.004s}}{4.024s^2+4.007s+1}$ $\frac{1.0003e^{-1.996s}}{(2.0043s+1)^2}$ $\varphi_m \approx -0.61^\circ$
3	$\frac{e^{-0.2s}}{0.5s^2+1.5s+1}$	$\frac{1.001e^{-0.2s}}{0.5004s^2+1.502s+1}$ $\frac{1.001e^{-0.189s}}{(0.7188s+1)^2}$ $\varphi_m \approx 2.27^\circ$
4	$\frac{e^{-s}}{2s^2+s+1}$	$\frac{1.002e^{-0.98s}}{2.013s^2+0.9946s+1}$ $\varphi_m \approx 0.6^\circ$
5	$\frac{e^{-10s}}{s(20s+1)}$	$\frac{0.999e^{-10.0034s}}{s(19.994s+1)}$ $\varphi_m \approx 2.88^\circ$
6	$\frac{(-2.4s+0.6)}{s(s+1)}$	$\frac{(-2.399s+0.6002)e^{-0.00269s}}{s(0.9995s+1)}$ $\varphi_m \approx 21.5^\circ$

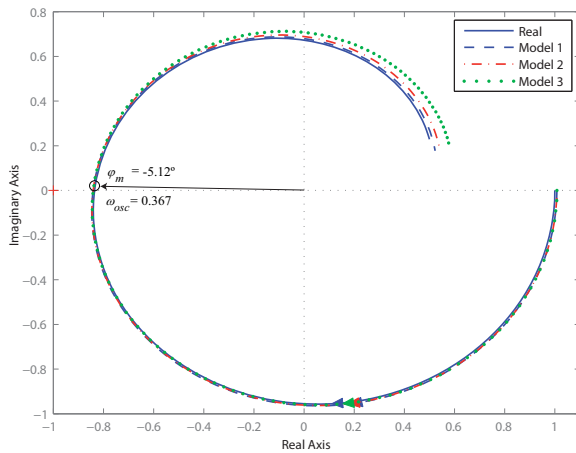


Figure 2: Nyquist curves of real process and models for Case 10.

Table II: Solutions for processes with higher order or different structure than the transfer function fitted.

	Real process	Proposed method
7	$\frac{e^{-2s}}{(10s+1)(s+1)}$	$\frac{1.002e^{-2.8632s}}{11.6998s+1}$ $\frac{1.002e^{-1.2824s}}{(4.129s+1)^2}$ $\frac{1.002e^{-2.0011s}}{10.013s^2+11.02s+1}$ $\varphi_m \approx 0.62^\circ$
8	$\frac{e^{-0.5s}}{(s+1)^5}$	$\frac{1.002e^{-3.1787s}}{3.3228s+1}$ $\frac{1.002e^{-2.254s}}{(1.8206s+1)^2}$ $\varphi_m \approx -0.01^\circ$
9	$\frac{e^{-6s}}{(s+3)(s^2+s+1)}$	$\frac{0.3336e^{-6.28s}}{0.9992s^2+1.05s+1}$ $\varphi_m \approx 3.58^\circ$
10	$\frac{(-s+1)e^{-4s}}{(s+1)^4}$	$\frac{1.008e^{-7.164s}}{1.855s+1}$ $\frac{1.0008e^{-6.305s}}{1.934s^2+2.609s+1}$ $\frac{1.0008e^{-6.4526s}}{(1.2479s+1)^2}$ $\varphi_m \approx -5.12^\circ$
11	$\frac{(-10s+1)e^{-s}}{s(s+1)^5}$	$\frac{(-10.36s+0.9824)}{s(2.646+1)}e^{-3.12}$ $\varphi_m \approx 12.5^\circ$
12	$\frac{(-5s+1)e^{-0.5s}}{s(s+1)(s^2+s+1)}$	$\frac{(-5.167+0.9768)}{s(0.5523s+1)}e^{-1.83s}$ $\varphi_m \approx 14^\circ$

4 Selecting the identification phase margin

The identification approach using a relay without hysteresis produces a model that corresponds exactly with the dynamics of the true process at the oscillation frequency, that is $G(j\omega_{osc}) = \hat{G}(j\omega_{osc})$. If the order of the process is equal to the transfer function model to fit, the identification will be exact and the behaviour of $\hat{G}(s)$ will be equal to $G(s)$ in all the frequencies range. However, if the order of process and model is different, it can be necessary to modify the oscillation frequency to find a more suitable approximation to the pursued control purposes. It is known that for PI control the identification should be done at an oscillation frequency that corresponds to a phase margin $\varphi_m = 45^\circ$ due to the phase lag that the PI control

introduces. For PID control the phase margin should be 0° as the controller provides phase lead [2].

In the previous examples, the phase margin is not 0° and changes depending of the features of the process. Theoretically, the bias added to the output cannot be used for this purpose as it does not affect to the phase margin as not provide phase shifting (see [5]),

$$\frac{-1}{N(A) + bias} = -\frac{\pi A}{\pi A \cdot bias + 4D} \quad (35)$$

To obtain a point in the Nyquist curve different to the obtained with the simple relay can be done by introducing hysteresis in the relay ([1]). The negative reciprocal of the DF of a biased relay with hysteresis is

$$\frac{-1}{N(A, \delta)} = -\frac{\pi}{4D} \sqrt{A^2 - \delta^2} - i \frac{\pi \delta}{4D} \quad (36)$$

where A is the oscillation output, D the relay amplitude, and δ the hysteresis (it must be noticed that the reciprocal is independent of the bias). As happens in the simple relay, this function is represented in the Nyquist map as a straight line parallel to the real axis. However, by increasing δ , the line can be move down along the imaginary axis of the Nyquist map. As the intersection of $G(s)$ with this line means the existence of an oscillation, the critical point where the intersection happens can be modified, increasing the phase margin to fulfill the user specifications.

From (36), the theoretically phase margin obtained by applying hysteresis to the relay is defined by

$$\varphi_m = \arctan\left(\frac{\delta}{\sqrt{A^2 - \delta^2}}\right) = \arcsin\left(\frac{\delta}{A}\right) \quad (37)$$

where $A \geq \delta$. Obviously, this expression provides just an approximation that depends on the features of the true process.

Example 3: The result of the identification of $G(s) = e^{-s}/s(s+1)$ using a relay with $D=1$, $\delta = 0$, and $bias=0.1D$ is

$$\hat{G}_1(s) = \frac{(-0.1614s + 1.051)e^{-0.781s}}{s(1.139s + 1)}$$

with $\varphi_m \approx 2.66^\circ$. If the hysteresis is increased to $\delta = 2$, the result of the identification is

$$\hat{G}_2(s) = \frac{(-0.08321s + 1.001)e^{-0.929s}}{s(1.005s + 1)}$$

with $\varphi_m \approx 46^\circ$. In Figure 3, it can be appreciated the differences between the two results. The differences are explained by the fact that the identification algorithm is based on the fitting of the curve that represents a transfer function template to the curve that corresponds to the true process in the Nyquist map using the critical point as linkage between both curves. If model and process are similar (same degrees of freedom), the fitting is exact as the transfer function curve can be adjusted to the true process curve. However, if model and process own different structures, then the model curve cannot be adjusted exactly in all the frequency range to the process. In the Example 3, as the true process is with integration, the identification with a phase margin around 45° or higher will produce better results as the model curve adapts better to the real process in the third quadrant.

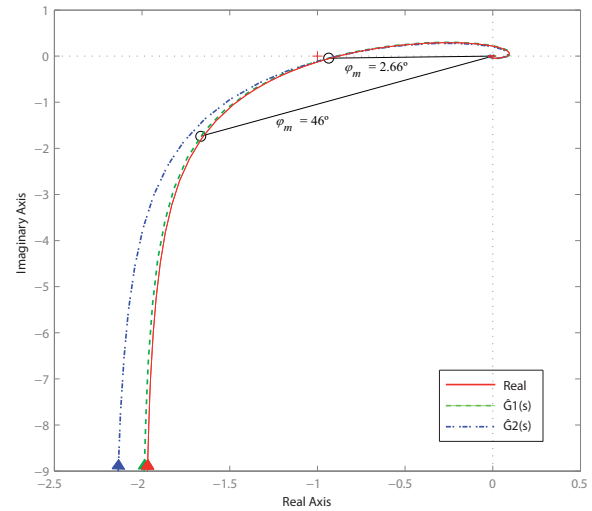


Figure 3: Example of the differences in the identification results depending of the phase margin.

4.1. Automatic generation of the hysteresis

In the previous example, the hysteresis was fixed by trial and error in successive simulations. A solution proposed in [1] for autotuning of PID controllers can be adapted to adjust iteratively the hysteresis during the tests using the information obtained from the experimental measure of $G(j\omega_{osc})$. The formula is

$$\delta_{n+1} = \delta_n + \lambda(\varphi_{ref} - \varphi_n) \frac{\delta_n - \delta_{n-1}}{\varphi_n - \varphi_{n-1}} \quad (38)$$

where φ_{ref} is the desired phase margin and $\lambda \leq 1$ is a convergence speed factor.

Example 4: Applying the iterative method to the identification of the process of Example 3 using (38), fixing $\varphi_{ref} = 45^\circ \pm 1^\circ$ and $\lambda = 0.5$, it is obtained $\delta = 1.897$ and the new identified model is

$$\hat{G}_3(s) = \frac{(-0.02286s + 1)e^{-0.979s}}{s(s+1)} \quad (39)$$

with $\varphi_m \approx 45.32^\circ$.

Conclusions

An enhanced method for the identification of stable transfer functions models has been presented and explained. The basis of the method is the oscillations that a relay generates in the feedback control loop. Instead of using the approximations of the intersection points that the describing function of the relay provides, on-line measurements of the process and control signals are used to obtain the harmonics needed to solve the linear equations and generate the estimations. In this way, the number of tests to make the estimations is always one regardless the order or structure of the model transfer function to fit. Moreover, the identification procedure is not iterative so the computational cost is very low. With the simple relay, the identification procedure is done near the ultimate frequency. By using a relay with hysteresis and modifying its value, the identification will be possible at a user-specified phase lag in the third quadrant.

Acknowledgements

This work has been funded by Spanish Ministry of Economy and Competitiveness under contracts DPI2012-31303 and DPI2014-55932-C2-2-R.

References

- [1] Åström, K.J., Hägglund T. (1984) "Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins", *Automatica* 20(5), pp. 645-651.
- [2] Åström, K.J., Hägglund, T. (2006) Advanced PID Control, ISA, 460 pages.
- [3] Chang, R.C., Shen, S.H., and Yu, C.C. (1992) "Derivation of transfer function from relay feedback systems", *Industrial & Engineering Chemistry Research* 31, pp. 855-860.
- [4] Friman, M., Waller, K.V. (1997) "A two-Channel relay for autotuning", *Industrial & Engineering Chemistry Research* 36(7), pp. 2662-2671.
- [5] Gelb, A., Van der Velde, W.E. (1968) Multiple-Input Describing Functions and Nonlinear System Design, McGraw-Hill, New York, USA.
- [6] Ghorai, P., Majhi, S., and Pandey, S. (2016) "Dynamic model identification of a real-time simple level control system", *Journal of Control and Decision* 3(4).
- [7] Li, W., Eskinat, E., and Luyben, W.L. (1991) "An improved autotune identification method", *Industrial & Engineering Chemistry Research* 30(7), pp. 1530-1541.
- [8] Luyben, W.L. (1987) "Derivation of transfer functions for highly nonlinear distillation columns", *Industrial & Engineering Chemistry Research* 26(12), pp. 2490-2495.
- [9] Pandey, S., Majhi, S. (2016) "Limit cycle based identification of second order processes with time delay", *Indian Control Conference* (2016), pp. 438-443
- [10] Scali, C., Marchetti, G., and Semino, D. (1999) "Relay with additional delay for identification and autotuning of completely unknown processes", *Industrial & Engineering Chemistry Research* 38 (5), pp. 1987-1997.
- [11] Shen, S.H., Wu, J.S., and Yu, C.C. (1996) "Use of biased-relay feedback for system identification", *AIChE Journal* 42(4), pp. 1174-1180.
- [12] Srinivasan, K., Chidambaram, M. (2003) "Modified relay feedback method for improved system identification", *Computers & Chemical Engineering* 27(5), pp. 727-732.
- [13] Srinivasan, K., Chidambaram, M. (2004) "An improved autotune identification method", *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly* 18(3), pp. 249-256.
- [14] Tan, K.K., Lee, T.H., and Wang, Q.G. (1996) "An enhanced automatic tuning procedure for PI/PID controllers for process control". *AIChE Journal* 42(9), pp. 2555- 2562.
- [15] Vivek, S., Chidambaram, M. (2005) "Identification using single symmetrical relay feedback test". *Computers & Chemical Engineering* 29(7), pp. 1625-1630
- [16] Wang, P., Gu, D., and Zhang, W. (2007) "Modified relay feedback identification based on describing function analysis". *Industrial & Engineering Chemistry Research* 46(5), pp. 1538-1546.

Robust PI controller for disturbance attenuation and its application for voltage regulation in islanded microgrid

R. Vilanova (Ramon.Vilanova@uab.cat), Carles Pedret (Carles.Pedret@uab.cat)
School of Engineering. Universitat Autònoma de Barcelona. , Barcelona, Spain

Orlando Arrieta (ORLANDO.ARRIETA@ucr.ac.cr) School of Electrical Engineering,
University of Costa Rica, 11501-2060 San Jose, Costa Rica.

Resumen

This work faces the problem of frequency deviation in microgrid systems. The considered microgrid includes renewable energy sources such as wind and solar photovoltaic. As long as these sources provide an irregular power supply or there is a sudden change in the system load, the power system frequency deviates. In order to compensate such deviations, alternative, conventional energy sources should be commanded in order to provide the corresponding power deficit. In this paper a very simple and of common industrial practice control approach such as the Direct synthesis based on first order plus time delay models is proposed to tune a PI controller. Time domain simulations show the effectiveness of the approach as compared with other more sophisticated controllers (Fractional order PID) already proposed in the literature.

Palabras clave: PI Control, Disturbance attenuation, Microgrid,

1 Introduction

A MicroGrid (MG) is a small scale grid that can integrate distributed renewable energy sources, conventional generators, energy storage systems and consumers. It can be operated in either grid-connected or islanded mode in case of grid faults or planned islanding. [1,2]. The MG embodies the concept of a single organized power subsystem comprising a number of distributed generation systems, both renewable (such as photovoltaic, wind power, hydro and fuel-cell devices) and/or conventional generation (such as internal combustion engines, micro-turbines and diesel generators) and a cluster of loads [1]. Some of the benefits of MG, including enhanced local reliability, reduced feeder loss, better local voltage support, increased efficiency, voltage sag correction or uninterruptible power supply function are also reviewed in [2, 3].

In recent years, emphasis has been placed on renewable energy based MG systems. In order to improve the efficiency of MGs and to reduce fossil fuel usage and pollution, renewable energy sources may be integrated with traditional MGs. Renewable energy sources include photovoltaic power, hydro power and wind power. These are clean and abundantly available energy sources. However as the power generation of such units is highly dependent of external environmental factors, the generated powers are subject to variations that can impact the MG supplied frequency and therefore the quality of the MG as a generation system. In order to facilitate to operate in islanded mode for extended periods with renewable energy sources involved, it is critical to maintain the frequency deviations within a small range in order to satisfy operating requirements.

Therefore, a reliable and stable operation of isolated hybrid renewable energy system is more complex, unlike those that are grid connected. The fluctuations in both wind speed and solar radiation lead to mismatch between the power generation and load demand resulting into deviation in system frequency and voltage from the nominal value. These undue disturbances if allowed to exceed beyond the tolerance limit may lead to undesired performance and result into damage of the connected devices/equipments.

As a result of the reported problem, different control methods have been proposed in the literature to tackle frequency deviations. Proportional-Integral-Derivative (PID) control has been well studied by a number of researchers [4], [5], [6]. H_{inf} control is considered in [7] and [8]. Recently, there has been some interest in the application of intelligent approaches such as those based on Fuzzy Logic control, as in [9], or evolutive optimization algorithms such as genetic algorithm based PID controllers [10], robust PSO-based H_{inf} [7], robust H_{∞} and μ -synthesis approaches [11]. The application of such advanced optimization methods has also been focused in the tuning of fractional order PID (FOPID) controllers. As an

example, the kriging based surrogate modeling method in [12] is used to design a FOPID controller, whereas in [13] a chaotic PSO based fractional order fuzzy PID controller is faced. In addition, [14] utilised a chaotic NSGA-II algorithm to design a FOPID.

The main focus of the mentioned approaches is to regulate for frequency deviations. However, it is also important to account for control input usage. As the main task of the controller will be to push for conventional generation when power delivered by the renewable sources does not satisfy demand, this control signal will determine the requirement for extra fuel in the generation units. This need for more efficient control from the input usage, while maintaining frequency deviation within the required limits, is the main motivation for the application of simple control strategies that while achieving average frequency deviation within the desired levels, its tuning allows for an easy tradeoff between accuracy and control input usage. This input usage will directly translate from smooth to high frequency power demand generation.

The controller that is proposed in this paper is a simple PI controller tuned on the basis of the Internal Model Control. One of the attractive features of the PI based IMC. This is a very straightforward approach, also well known from industrial practice. The controller design complexity is kept at a minimum. There will be no need for going through complex optimization approaches and, in addition, the process information will be as simple as a first order plus dead time model. As these models are usually employed in industry, jointly with IMC formulations, it is the authors opinion that this fact will definitely help system operators to gain confidence in the control scheme.

2 Micro Grid system description and modelling

A typical setup of a MG with storage system is shown in Figure 1. The energy sources include both conventional and renewable generation systems. This system can be easily extended to more complex MGs, with additional generators. However the main idea is to increase the usage of renewable energy, and so reduce the fossil fuel consumption, while at the same time maintaining system stability. Here system stability is reflected by incurring only limited system frequency deviations, despite the presence of significant transients. The MG system used in this work is based on the study presented in [15] and used in [12] to

derive a FOPID controller. The system includes various power generating units like the wind turbine, photovoltaic cell, fuel cells, and diesel energy generator. There is also a battery and a flywheel energy storage system. The dynamical models in

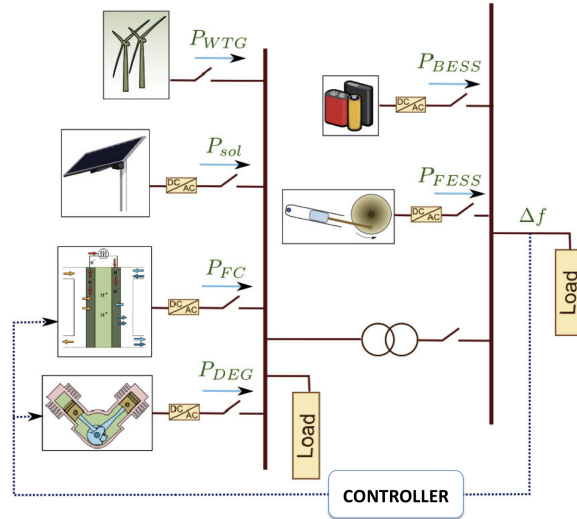


Figure 1: Layout for the microgrid system considered in this work. [12]

Figure 1. are represented here as small signal linearized transfer functions which captures the dynamic characteristics at a specific operating point [15],[10]. Even with such simplifications, these models still capture the essential power/frequency tradeoffs present in a MG system. Since is caused by the imbalance between the power generated and the power consumed by the load, signals in the model are first normalized to per-unit (pu), and then shifted to deviations around 0 (corresponding to deviations from nominal 60 Hz [16]). The characterization of the renewable energy sources power as well as the load power demand follows the patterns presented in [10]. The established deterministic drifts are complemented here with stochastic power fluctuations. A general template that gives rise to a time-series with small stochastic fluctuations about the mean generated or demand power is used. The general template is chosen as:

$$P = \frac{\phi\nu\sqrt{\beta}(1 - G(s)) + \beta}{\beta}\Gamma = \chi\Gamma \quad (1)$$

where, P represents the power output of the solar, wind or the load model, ϕ is the stochastic component of the power, β contributes to the mean value of the power, $G(s)$ is a low pass filter, ν is a constant in order to normalize the generated or demand power (χ) to match the per unit (pu)

level, Γ is a time dependent switching signal with a gain which dictates the sudden fluctuation in mean value for the stochastic power output. Being $U(-1, 1)$ a random uniform distribution between -1 and 1, and $h(t)$ the unitary Heaviside step function, the parameters in (1) for each one of the three generators are given by:

Wind Power generation:

$$\phi \equiv U(-1, 1), \nu = 0.8, \beta = 10, G(s) = 1/(10^4 s + 1)$$

$$\Gamma = 0.24h(t) - 0.04h(t - 140)$$

Solar Power generation:

$$\phi \equiv U(-1, 1), \nu = 0.1, \beta = 10, G(s) = 1/(10^4 s + 1)$$

$$\Gamma = 0.05h(t) + 0.02h(t - 180).$$

Load Power demand:

$$\phi \equiv U(-1, 1), \nu = 0.9, \beta = 10$$

$$G(s) = 300/(300s + 1) + 1/(1800s + 1)$$

$$\begin{aligned} \Gamma = & 0.02h(t) + (1/\chi)(0.9h(t) + 0.03h(t - 110) \\ & + 0.03h(t - 130) + 0.03h(t - 150) \\ & - 0.15h(t - 170) + 0.1h(t - 190)) \end{aligned}$$

For what matters to the small signal models for each one of the MG system components, they are given as in [15] and [12] by the following transfer functions and model parameters:

Wind turbine generator (WTG)

$$K_W = 1, T_W = 1.5\text{sec and}$$

$$G_{WTG}(s) = \frac{\Delta P_{WTG}}{\Delta P_W} = \frac{K_W}{T_W s + 1}$$

Solar photovoltaic (PV) system

$$T_{IN} = 0.04\text{sec}, T_{IC} = 0.004\text{sec and}$$

$$G_{PV}(s) = \frac{\Delta P_{PV}}{\Delta P_{sol}} = \frac{1}{(T_{IN}s + 1)(T_{IC}s + 1)}$$

Diesel engine generator (DEG)

$$T_G = 0.08\text{sec}, T_T = 0.4\text{sec and}$$

$$G_{DEG}(s) = \frac{\Delta P_{DEG}}{\Delta u} = \frac{1}{(T_G s + 1)(T_T s + 1)}$$

Fuel cell (FC)

$$K_{FC} = 1, T_{FC} = 0.26\text{sec and}$$

$$G_{FC}(s) = \frac{\Delta P_{FC}}{\Delta u} = \frac{K_{FC}}{(T_{FC}s + 1)(T_{IN}s + 1)(T_{IC}s + 1)}$$

Battery energy storage system (BESS)

$$K_{BESS} = 1, T_{BESS} = 0.1\text{sec and}$$

$$G_{BESS}(s) = \frac{\Delta P_{BESS}}{\Delta f} = \frac{K_{BESS}}{T_{BESS}s + 1}$$

Flywheel energy storage system (FESS)

$$K_{FESS} = 1, T_{FESS} = 0.1\text{sec and}$$

$$G_{FESS}(s) = \frac{\Delta P_{FESS}}{\Delta f} = \frac{K_{FESS}}{T_{FESS}s + 1}$$

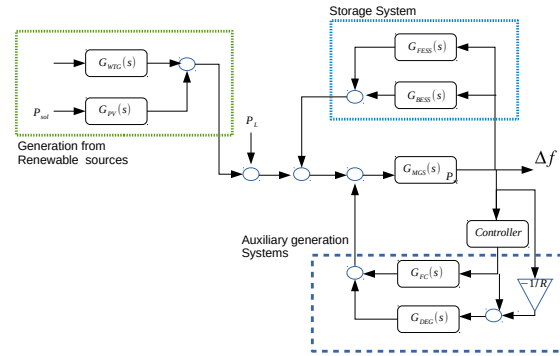
Microgrid system

$$D = 0.015\text{pu}/\text{Hz}, H = 1/12\text{pu}\cdot\text{sec}, R = 3\text{Hz}/\text{pu}$$

and

$$G_{MGS}(s) = \frac{\Delta f}{\Delta P_e} = \frac{1}{2Hs + D}$$

For a more detailed description of the different units the interested reader is referred to [15] and [12]. Figure (2) provides the corresponding block diagram identifying the constitutive blocks of the MG system.



Figurea 2: Block diagram for the considered microgrid.

3 Direct synthesis design (DS-d)

he Internal Model Control (IMC) approach for controller design as presented in [17] and further developed in [18] is based on the very basic principle of *close the loop when necessary*.

One of the drawbacks of the IMC design is its poor response for load disturbance attenuation, specially when the system has slow time constants. Main reason for this is the fact that the plant dynamics appear in the disturbance to output response. In order to improve the regulation capabilities, some proposals have appeared in the literature. Widely referred works that concentrate

on tuning for improved disturbance rejection are, for example, [19, 20]. the direct synthesis (DS-d) method presented in [19] is perhaps the most generic one (it applies to a wide selection of process dynamics) for tuning of PI/PID controllers for input load disturbance attenuation.

The direct synthesis method is based on the specification of a desired y/d relation, denoted as $(y/d)_d$, and impose this relation for the regulatory closed-loop transfer function as:

$$C_y(s) = \frac{P_d(s)}{\left(\frac{y}{d}\right)_d P_u(s)} - \frac{1}{P_u(s)} \quad (2)$$

that simplifies to

$$C_y(s) = \frac{1}{\left(\frac{y}{d}\right)_d} - \frac{1}{P_u(s)} \quad (3)$$

when $P_d(s) = P_u(s)$. It is under this assumption and for a set of concrete dynamics for the process model transfer function $P_u(s)$, that in [19] tunings for the PI/PID controller parameters are suggested.

PI tuning relations

In fact, The DS-d method is presented as the disturbance counterpart to the more extended IMC that is based on specifying a tracking specification. For these two methods, the tuning relations that are provided for a PI controller applied to a first order plus time delay model are:

- *Process model:*

$$P_m(s) = \frac{K_m e^{-L_m s}}{T_m s + 1}$$

- *PI-IMC Tuning:*

$$K_p = \frac{T_m}{K_m(\lambda + L_m)} \quad T_i = T_m$$

- *PI-Load (DS-d) Tuning:*

$$K_p = \frac{2T_m - \lambda}{K_m \lambda} \quad T_i = \frac{(2T_m - \lambda)\lambda}{T_m}$$

4 Control problem definition

In this section the control goals that will be used to evaluate and to compare the different control approaches will be defined first. Second, we present the different controllers that will be applied to the MG scenario presented above. Two of the selected approaches are taken from recent literature results that are based on the same micro grid layout as the one presented here. Therefore more well suited for a fair comparison.

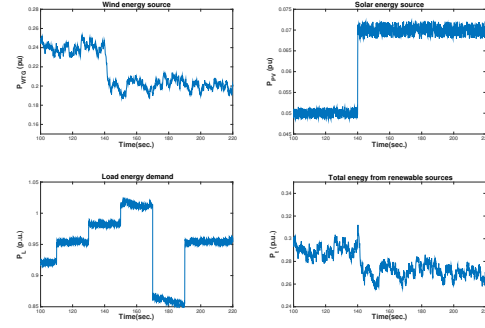


Figura 3: Stochastic realization for the wind and solar energy generation and power load demand

4.1 Control problem definition

As detailed when presenting the MG model, the power generation for the wind turbine generator, solar photovoltaic and the load are based on random functions. Figure 3 shows a single realization of the corresponding stochastic processes. As per the framework defined in [10] and [12], in the present work, it is considered that the MG was operating at 1 p.u. load during $0 < t < 100$ sec and the control system performance has been evaluated then for a finite time horizon of $100 < t < 220$ sec considering the changes in both the demand load and renewable generations shown in Figure 3. The primary goal of the control system is to maintain frequency fluctuation Δf at a minimum hence better power quality. Regarding the frequency deviation, as commented in [8], in general, for MGs, should be limited to within 1%, and the recovery time limited to couple of seconds. Otherwise most conventional breakers will trip, with the subsequent possibility of cascade effects. On that basis, we will take here a band of ± 0.005 that corresponds to a deviation of 0.5%. As a statistical measures will compute its mean $\mu(\Delta f)$ and standard deviation $\sigma(\Delta f)$.

In order to provide good quality of supply frequency can be maintained at the desired level by maintaining the active power balance between generation and demand. For such purpose, there is the need of a control system that compensates for the high fluctuations in renewable energy generators such as those based on wind and solar units. For such purpose the controller should provide the needed additional power. This is accomplished by sending the control signal to the fuel cell (FC) and the diesel energy generator (DEG) on the basis of the frequency deviation in the MG. The control signal, basically determines the supply for extra fuel on these units i.e., like the hydro-

gen flow rate in the FC and mass flow rate of oil in DEG. Regarding the flywheel and battery units, as in [9] their inputs are directly taken from the grid frequency oscillation signal without the intervention of the controller as these devices does not need sophisticated control.

Even the small signal models are transfer function based, saturation and rate limit constraints are used in order to constraint the extraction/storage of power. The output saturations (in pu) and rate constraints for the different energy storage and generation units are [12]:

$$|P_{FESS}| < 0.11, |P_{BESS}| < 0.11$$

$$0 < P_{FC} < 0.48, 0 < P_{DEG} < 0.45$$

$$|P_{FESS}| < 0.05, |P_{BESS}| < 0.05$$

$$|P_{FC}| < 1, |P_{DEG}| < 0.5$$

4.2 (FOPID) Fractional PID

In [12] the use of a fractional order PID (FOPID) controller for a MG is investigated. The transfer function representation for the considered FOPID controller is given by

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\nu \quad (4)$$

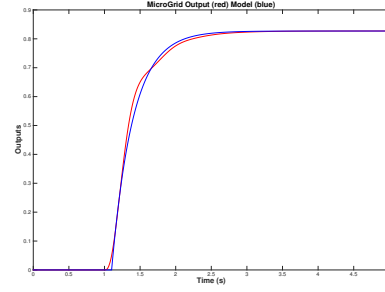
In [12], a global optimization approach is employed to obtain the five parameters of the FOPID controller. A kriging assisted surrogate modelling methodology is embedded within a global optimization framework for the design of the FOPID. As the models for the load and renewable energy sources are defined statistically, the evaluation of the cost function is stochastic. Therefore the function is evaluated multiple times and the expected value of the objective function is considered for optimization. The chosen cost function is a combined quadratic cost function that tradeoffs the frequency deviation and control usage:

$$J = \int_{t_{in}=100}^{t_{fi}=220} \left[\omega(\Delta f)^2 + \frac{(1-\omega)}{K_n}(\Delta u)^2 \right] dt \quad (5)$$

where, ω determines the relative importance of the two conflicting objectives and K_n is a normalizing constant. The values used in [12] are $\omega = 0.7$, $K_n = 10^4$. The resulting optimal values for the FOPID are

$$K_p = 0.950 \quad K_i = 4.350 \quad K_d = 1.250 \quad \lambda = 0.66 \quad \nu = 0.7 \quad (6)$$

In the same work, [12], it is shown that the FOPID provides superior performance over the integer order ideal controller. However, It has to be said



Figurea 4: FOPTD model approximation for the MG system to the relation $\Delta f/\Delta u$

that both controllers, fractional and integer, are formulated as ideal controllers. Therefore, no derivative filters are mentioned. This may be a serious practical problem when using derivative action as any noise in the measurements will be transferred into the control signal. Another important point regarding the obtention of 6 is that the optimisation is carried out by considering the overall MG model. This does includes the stochastic power generation from the renewable sources.

4.3 PI controller

The design of an IMC controller entails no secrets. The first element we need in order to face the IMC design is a model of the system. As usual industrial practice and in order to show the simplicity of the approach, a first order model will be approximated on the basis of a step-response test. Assuming the production of energy and load requirements are balanced, therefore there is no disturbance in the system, a step change is applied at the control input and the generated effect in the Δf recorded. As a result, it can be seen in figure 4 that a first order plus time delay (FOPTD) model

$$P_m(s) = \frac{K_m e^{-L_m s}}{T_m s + 1} = \frac{0.496 e^{-0.1s}}{0.35s + 1} \quad (7)$$

suffices to provide a reasonable approximation of the MG dynamics. Notice that the disturbance generators (variations in the power generation and/or power load demand) are not modelled here. With this model approximation, the PI controller can be tuned by using either the IMC or the DS-d approach. The only thing that is left to choose is the λ parameter. In order to select the appropriate value for λ , a tradeoff analysis between the frequency deviation and input usage has been conducted. Input usage has been measured in terms

of the total variation (TV) of the control signal.

$$TV(u) = \sum_{k=1}^N |u(t_k) - u(t_{k-1})|$$

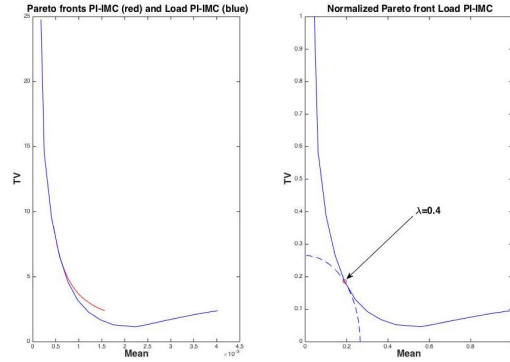
This way, in figure (5) the influence of λ on performance and control usage has been determined. For both approaches λ has been ranged between 0.1 and 1 and a sufficiently smooth approximation to the respective Pareto fronts has been determined. Due to the fact that the renewable energies are defined by stochastic processes, in order to get a well defined Pareto front, a Montecarlo experiment should be ran. In order to compare the tradeoff offered by both approaches, the objective functions have been normalised (each one of them according to its respective worst values). As it can be seen in figure (5) the solutions corresponding to the DS-d design dominates the IMC ones. It can be seen that if high accuracy (low mean) is expected, both approaches provide the same tradeoff. However, it is in the middle region and for lower levels of input usage that the load disturbance approach provides better tradeoff. In some sense this was to be expected, but the Pareto fronts confrontation provides a clear qualitative measure of the superiority of the regulatory designs. The figure also shows the points corresponding to the minimum distance to the origin. The corresponding point in the Pareto front provides the tradeoff solution that minimises (the normalised version of)

$$J = \sqrt{(\Delta_f)^2 + TV^2}$$

Whereas for the DS-d design the best tradeoff is $J = 0.26$, for the IMC PI, the best tradeoff provides $J = 0.73$. In the next section, time domain simulations of the fractional PID controller will be compared with this tradeoff DS-d solution. Note this is a slightly different version of the cost (5) where there is no need for an *a priori* selection of any weight.

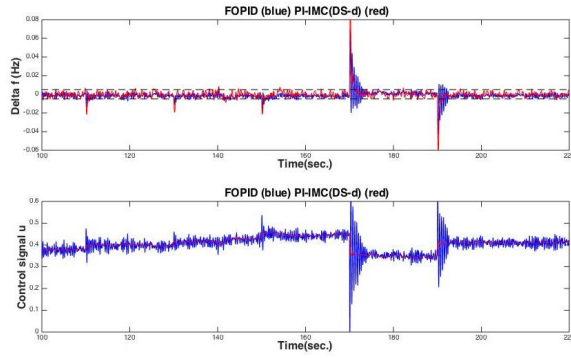
5 Simulation results

This section shows time domain simulations of the MG system affected by the stochastic variations determined by the changing power generation and load demand. It is considered that the MG was operating at 1 p.u. load during $0 < t < 100$ sec and the control system performance has been evaluated then for a finite time horizon of $100 < t < 220$ sec considering changes in both the demand load and renewable generations according to Figure 3.

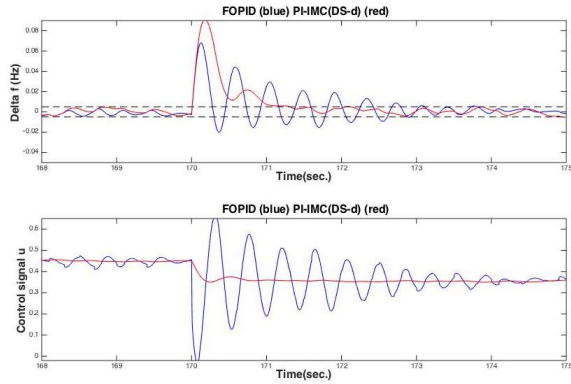


Figurea 5: Tradeoff analysis between the mean of the frequency deviation ($\mu(\Delta f)$) and the required input usage, $TV(u)$. Comparison of Pareto fronts for the IMC and DS-d PI

Figure 6, shows the frequency deviation from its nominal value for all the evaluation period. As it can be seen, both controllers are able to keep the frequency deviation is maintained within a ± 0.005 interval almost all the time. Even this global appreciation, the dynamics of the fractional order controlled system can be appreciated to be highly oscillating. Even during normal operation (no sudden load changes) the frequency deviation oscillation is kept within the allowed interval, the needed control signal is of considerable larger magnitude. The immediate repercussion of this manipulated variable high activity is the power demand that will be asked to the storage system, that will be continuously going up and down. This is reflected on the TV value for the Fractional PID, $TV_{FOPID} = 76.31$, whereas for the PI-IMC this value goes down to $TV_{PI-IMC} = 4.59$. In fact, the PI control signal is dramatically smoother than that of the Fractional order PID. This high control signal activity is directly translated to the system's output. Regarding the overall performance of both control systems, table (1) shows the mean and standard deviations. For both metrics, the PI controller improves performance within one order of magnitude. It should be noted that the computed standard deviation also includes the deviation generated by the large disturbances incurred because of the sudden changes in the load demand. Apart from the general, aggregated, regulation properties of the controller it is important to recover from a sudden change in the power deficit (either because of lower power generation from the renewable sources or increment of the load power demand) as fast as possible. On that respect, figure 7 shows a more detailed view of the signals corresponding to the 7sec. interval where the



Figurea 6: Regulated power system frequency deviation for the Fractional order PID and the IMC Pi designed for load disturbance



Figurea 7: Comparison of recovery from a large change in the load demand

large load demand occurs. It is seen that the PI-IMC controller, recovers to the ± 0.005 band in almost 1sec, whereas the FOPID; because of the large gains incurred, takes almost 3 sec. Regarding the control signal activity, it is rather easy to take it into account because of the λ parameter in the IMC approach. This is quantitatively reflected in the tradeoff curve presented in the previous section. However it is clear the effect of increasing λ in case we need to smooth the control signal even more in order not to damage the pumps, motors, etc for the fuel supplies. As an example, if we use an IMC controller tuned with $\lambda = 0.6$, we loose some degree of performance as we move to $\mu(\Delta f) = 1.810^{-3}$ with a standard deviation of $\sigma(\Delta f) = 2.410^{-2}$. On the other hand, control signal usage has been decreased to 1.29 and the associated IAE also decreased $IAE_u^{PI-IMC} = 0.0085$.

Table 1: Performance comparison

Controller	$ \mu(\Delta f) $	$\sigma(\Delta f)$	TV(u)
Fract. PID	$2.87 \cdot 10^{-3}$	$2.84 \cdot 10^{-2}$	76.31
IMC-load (DS-d)	$0.76 \cdot 10^{-3}$	$1.75 \cdot 10^{-3}$	4.59

6 Conclusions

In this paper a Proportional-Integral controller tuning based on Internal Model Control has been proposed and applied to the frequency deviation problem in isolated microgrid systems. The considered microgrid is based on the use of renewable energy generation units such as those based on wind and solar. The major problem that these kind of systems has to encompass is the regulation compensation for sudden generated power deficits. It has been shown that the PI controller is able to command the conventional generators in a very smooth way. The major benefit of this approach is the drastic reduction in control activity and energy generated from the conventional generation units such as diesel and fuel cells.

It has to be highlighted that the tuning of the controller is very intuitive as it is based on the selection of just one parameter with a clear interpretation regarding the closed-loop control system bandwidth and, correspondingly, control signal activity.

The main proposal of the work was to keep the control algorithm complexity at a minimum. Both in its formulation and in its design. As a continuation work, other control approaches that could be recast within the IMC framework. Specially robust control approaches will be foreseen as one aspect not examined in this work is the effect of parameter variations in the system components. This robustness issue is very important as the design of the controller is based on very simple models originated from a small signal analysis.

Acknowledgements

This work was partially supported by the grant MINECO/FEDER DPI2016-77271-R. The support received from the University of Costa Rica is also greatly appreciated.

References

- [1] R. Lasseter and P. Paigi, "Microgrid: a conceptual solution," in *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Confer-*

- ence (*IEEE Cat. No.04CH37551*). IEEE, 2004.
- [2] C. Marnay and G. Venkataramanan, "Microgrids in the evolving electricity generation and delivery infrastructure," in *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. IEEE, 2006.
 - [3] O. Palizban, K. Kauhaniemi, and J. M. Guerrero, "Microgrids in active network management—part i: Hierarchical control, energy storage, virtual power plants, and market participation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 36, pp. 428–439, aug 2014.
 - [4] B. Dong, Y. Li, and Z. Zheng, "Control strategies of DC-bus voltage in islanded operation of microgrid," in *2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*. IEEE, jul 2011.
 - [5] V. S. Sundaram and T. Jayabarathi, "Load frequency control using PID tuned ANN controller in power system," in *2011 1st International Conference on Electrical Energy Systems*. IEEE, jan 2011.
 - [6] P. K. Ray, S. R. Mohanty, and N. Kishor, "Proportional–integral controller based small-signal analysis of hybrid distributed generation systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 4, pp. 1943–1954, apr 2011.
 - [7] V. P. Singh, S. R. Mohanty, N. Kishor, and P. K. Ray, "Robust h-infinity load frequency control in hybrid distributed generation system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 46, pp. 294–305, mar 2013.
 - [8] Y. Han, P. M. Young, A. Jain, and D. Zimmerle, "Robust control for microgrid frequency deviation reduction with attached storage system," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 557–565, march 2015.
 - [9] H. Bevrani, F. Habibi, P. Babahajyani, M. Watanabe, and Y. Mitani, "Intelligent frequency control in an ac microgrid: On-line pso-based fuzzy tuning approach," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 4, p. 1935–1944, dec 2012.
 - [10] D. C. Das, A. Roy, and N. Sinha, "Ga based frequency controller for solar thermal-diesel-wind hybrid energy generation/energy storage system," *Int. J. Elect. Power Energy Syst*, vol. 43, no. 1, p. 262–279, 2012.
 - [11] H. Bevrani, M. Feizi, and S. Ataee, "Robust frequency control in an islanded microgrid: Hinf and mu-synthesis approaches," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 706–717, 2016.
 - [12] I. Pan and S. Das, "Kriging based surrogate modeling for fractional order control of microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 1, jan 2015.
 - [13] —, "Fractional order fuzzy control of hybrid power system with renewable generation using chaotic pso," *ISA transactions*, vol. 62, pp. 19–29, 2016.
 - [14] —, "Fractional-order load-frequency control of interconnected power systems using chaotic multi-objective optimization," *Applied Soft Computing*, vol. 29, pp. 328–344, 2015.
 - [15] D. J. Lee and L. Wang, "Small-signal stability analysis of an autonomous hybrid renewable energy power generation/energy storage system part i: Time-domain simulations," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 1, pp. 311–320, 2008.
 - [16] D. Rerkpreedapong, A. Hasanovic, and A. Feliachi, "Robust load frequency control using genetic algorithms and linear matrix inequalities," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, p. 855–861, 2003.
 - [17] D. E. Rivera, M. Morari, and S. Skogestad, "Internal Model Control. 4. PID controller design," *Ind. Eng. Chem. Des. Dev.*, vol. 25, pp. 252–265, 1986.
 - [18] M. Morari and E. Zafiroiu, *Robust Process Control*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1989.
 - [19] D. Chen and D. Seborg, "PI/PID Controller Design Based on Direct Synthesis and Disturbance Rejection," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 41, pp. 4807–4822, 2002.
 - [20] M. Shamsuzzoha and M. Lee, "Analytical design of enhanced PID filter controller for integrating and first order unstable processes with time delay," *Chemical Engineering Science*, vol. 63, pp. 2717–2731, 2008.

INFRAESTRUCTURA PARA EXPLOTACIÓN DE DATOS DE UN SIMULADOR AZUCARERO

Jesús M. Zamarreño, Cristian Pablos, Alejandro Merino, L. Felipe Acebes, César de Prada
 Grupo de Investigación en Control y Supervisión de Procesos, Universidad de Valladolid
jesusm@autom.uva.es, cristian.pablos@uva.es, alejandro@cta.uva.es, felipe.acebes@eii.uva.es,
prada@autom.uva.es

Resumen

En este trabajo mostramos el desarrollo de una posible infraestructura para implementar algoritmos RTO (Real Time Optimization, optimización en tiempo real) en un sistema industrial. Para ello, construiremos el sistema sobre un simulador de una factoría azucarera que nos permita probar los algoritmos en simulación. Como base de datos industrial que permita el almacenamiento y análisis de los datos usaremos el PI System de la empresa Osisoft®. Finalmente, como entorno desde el que probar los algoritmos RTO usaremos Matlab de la empresa Mathworks®.

Palabras Clave: RTO, Simulador, Base de datos, Energía.

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El presente trabajo está enmarcado dentro del proyecto “Integración de Optimización y Control en plantas de procesos” (DPI2015-70975-P) financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER). Dentro de dicho proyecto se plantea un caso de estudio que consiste en un simulador de planta completa de una factoría azucarera orientado al secuenciamiento y operación conjunta de secciones continuas-batch de gran escala, así como el desarrollo de sistemas RTO para la gestión energética (electricidad y vapor) en la factoría, y la coordinación de ambos RTO. Para hacer posible las pruebas de estos sistemas, además del propio simulador de planta completa (ya disponible como resultado de proyectos previos [4]), es necesario un sistema de gestión de datos industrial que permita un registro de los datos en tiempo real del simulador, así como un análisis de los mismos, y un entorno donde implementar y probar los algoritmos RTO.

Los sistemas RTO buscan determinar en tiempo real las mejores condiciones de operación de un proceso, normalmente considerando objetivos económicos, a la vez que se satisfacen una serie de condiciones

impuestas por las características físicas del mismo y los condicionantes de seguridad, calidad, etc., que puedan existir.

Debido a la creciente competencia a nivel mundial, a los costes energéticos, las exigencias de calidad en los productos, la necesidad de cumplir con normativas medioambientales o de seguridad, etc., así como a la complejidad creciente de los procesos productivos, una vez que se ha alcanzado un nivel básico de control y estabilidad en la operación de una planta, cada vez es más importante saber operar los procesos de forma óptima. Para ello, se debe decidir cuanto y cuando hay que producir en cada subproceso, las fuentes de energía más adecuadas, los puntos de operación de las unidades, etc. de modo que, respetando los rangos de operación admisibles de cada subproceso, el conjunto de los elementos de una planta conduzcan a la operación más eficiente y segura posible [3].

Los sistemas RTO están basados en un modelo del proceso y toman sus decisiones resolviendo un problema de optimización del tipo:

$$\begin{aligned} \min_{u, x, \theta} \quad & J(u, x) \\ h(x, u, \theta) = \quad & 0 \\ g(x, u, \theta) \leq \quad & 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Donde u son las variables de decisión o grados de libertad del proceso, x otras variables del mismo, J la función de costo económica que se quiere minimizar, h representa el modelo del proceso, con θ indicando sus parámetros, y g las restricciones de operación del mismo.

El modelo suele formularse en estado estacionario, dado que se busca encontrar las mejores condiciones de operación en las que debe mantenerse el proceso, las cuales se pasan a los sistemas de control como valores de referencia que deberán ser alcanzados y mantenidos por el mismo, según el esquema que puede verse en la parte izquierda de la Figura 1, en el que MPC representa el control predictivo multivariable. El problema (1) se resuelve

periódicamente a intervalos regulares para adaptarse al estado del proceso.

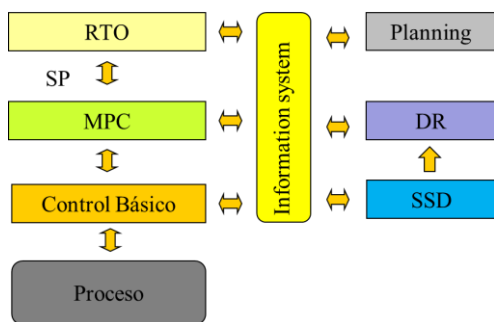


Figura 1: Jerarquía de acciones de decisión y control, sistema de información de la planta e implementación de RTO

Para formular específicamente y resolver el problema RTO (1), se requiere información tanto de los objetivos, precios, etc. impuestos por la planificación general de la producción en la factoría considerada, como información del estado del proceso. Ahora bien, dado que muchas variables del modelo no son medidas con precisión, y que los parámetros del mismo pueden ser inciertos o haber cambiado, lo más frecuente es acompañar al RTO de un problema de reconciliación de datos (DR), que se ejecuta con su misma periodicidad, y que proporciona valores de los parámetros θ del modelo y de las variables del mismo coherentes con el modelo y lo más cercanas posible a los valores medidos. Este problema de reconciliación de datos (DR) se formula también como uno de optimización, con el mismo modelo:

$$\begin{aligned} \min_{u, x, \theta} \quad & \sum [x - x_{med}]^2 + [u - u_{med}]^2 \\ h(x, u, \theta) = 0 \\ G(x, u, \theta) \leq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Donde el subíndice *med* indica valores medidos en planta. De este modo, el modelo se adapta a los posibles cambios en el proceso y se dispone de valores de las variables medidas y no medidas fiables. Como los cálculos se efectúan para estado estacionario, junto a la reconciliación de datos suele incluirse un módulo de detección de estado estacionario SSD.

Dado que son muchos los módulos que intercambian información sobre el estado del proceso y las acciones previstas, a nadie se le escapa el papel clave que juega el disponer de información actualizada, correcta y accesible a todos los niveles, para la realización de las funciones del RTO, así como de otras muchas [2]. Esto es, de un sistema de información que actúe como eje vertebral de comunicaciones, de modo que un esquema de

implementación del sistema RTO próximo a la realidad queda reflejado en la Figura 1 en su totalidad.

El artículo se estructura en 6 secciones. En esta primera sección de introducción hemos planteado el problema que vamos a abordar y los objetivos perseguidos. En la sección 2 describiremos someramente el simulador azucarero de planta completa. El sistema de gestión de datos se detalla en la sección 3. Las secciones 4 y 5 muestran el nivel de desarrollo actual del trabajo y el planteamiento futuro del mismo, respectivamente. Por último, terminamos con unas conclusiones generales en la sección 6.

2 EL SIMULADOR

Los simuladores son herramientas muy útiles en la industria de procesos, que permiten sustituir parcial o globalmente una planta industrial con fines muy diversos. Por ejemplo, la prueba y sintonía de sistemas de control, la incorporación o modificación de algunas partes de la planta, o incluso el entrenamiento de operarios de sala de control. La industria azucarera se caracteriza por ser un proceso muy complejo (Figura 2), que presenta gran parte de las operaciones unitarias presentes en la industria de proceso que operan en conjunto con dinámicas muy diferentes haciendo que modelarlo suponga un verdadero reto.

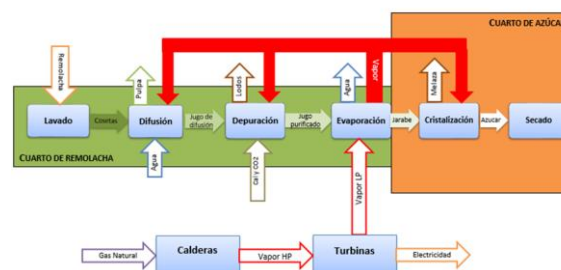


Figura 2: Esquema del proceso

Como se puede observar en la Figura 2, en el proceso azucarero existe una gran interacción energética entre las diferentes partes del proceso, relacionada sobre todo con el consumo del vapor procedente de la sección de evaporación por otros subprocesos. Además, se puede entrever que una de las mayores dificultades del modelado de la fábrica reside en que no solamente se trata de modelar el proceso principal, sino también otros subsistemas asociados, como la generación de vapor en las calderas o de electricidad en las turbinas.

Para el desarrollo del simulador se utilizó como herramienta de modelado y simulación EcosimPro® [5]. Este entorno de modelado y simulación de

carácter general, utiliza EL (EcosimPro Language) como lenguaje de programación perteneciente a la familia de lenguajes basados en ecuaciones y orientados a objetos. El paradigma del modelado orientado a objetos permite reducir drásticamente el tiempo dedicado al modelado de un sistema, gracias a características como modularidad, herencia y agregación.

Respecto a la arquitectura del simulador, cabe destacar tres líneas bien diferenciadas: la simulación, la comunicación entre simulaciones, y la interfaz de usuario del simulador. Respecto a la simulación, en primer lugar se desarrollaron una serie de librerías que contienen los elementos de proceso existentes en una fábrica [7]. Estos componentes abarcan desde intercambiadores de calor, depósitos, tuberías y válvulas, hasta equipos mucho más complejos y específicos como difusores, evaporadores, filtros o cristalizadores. Dichas librerías y la interfaz gráfica de EcosimPro permitieron, mediante la agregación de los componentes de las librerías de proceso, la creación de modelos mucho más complejos que representan fielmente el comportamiento de las distintas secciones en las que se divide el proceso. Se elaboraron un total de diez modelos de secciones o subsecciones diferentes. Estos modelos, además de simular el comportamiento del proceso en condiciones de operación normales, incluyen la posibilidad de provocar fallos en diversos equipos de la planta. Esto último resulta de gran relevancia ya que el objetivo inicial del simulador consiste en el entrenamiento de operarios de sala de control [8].

Debido al gran tamaño del modelo que se obtendría si se unieran los modelos de las secciones individuales en uno único, se hace imposible la ejecución del mismo en un único ordenador. Por ello, el simulador que nos ocupa se ejecuta de manera distribuida utilizando varios ordenadores para simular el comportamiento global de la planta, concretamente cinco.

Tanto para la comunicación de las simulaciones individuales, como para la comunicación entre las simulaciones y la interfaz de usuario, implementada usando un SCADA, se utilizó el estándar OPC [9]. Así, se crearon servidores OPC asociados a las simulaciones individuales, de modo que posteriormente se pudieran comunicar e intercambiar datos entre ellas. Para la creación de los distintos servidores OPC se desarrolló un software propio denominado CreaOPC, obteniéndose un total de diez servidores OPC a partir de los mencionados modelos de secciones completas y subsecciones.

Se desarrolló el software UneSim para intercambiar variables entre los servidores OPC cada intervalo de comunicación, y a su vez sincronizar la simulación

completa permitiendo que las diversas simulaciones avanzaran de forma coordinada en tiempo real o en proporción al mismo [12].

Finalmente, se desarrolló un completo SCADA, denominado EDUSCA [13], de modo que los usuarios pudieran manejar el simulador como si de una sala de control se tratase. Este SCADA es capaz de comunicarse vía OPC con las simulaciones de proceso. En la Figura 3 puede observarse un esquema conjunto del proceso de creación de un componente del simulador completo y de las comunicaciones asociadas.

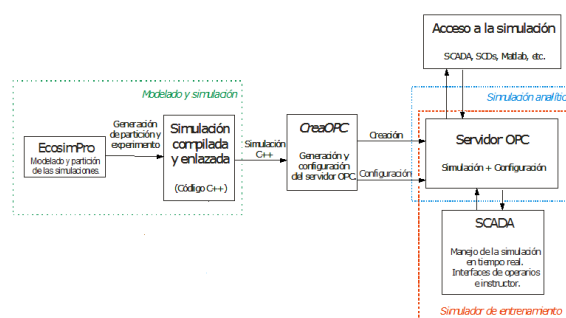


Figura 3: Diseño y comunicaciones del simulador

3 GESTOR DE DATOS

La empresa Osisoft® [11] comercializa un producto llamado PI System con capacidades para recoger, analizar, visualizar y compartir grandes cantidades de datos provenientes de múltiples fuentes con el objetivo de mejorar la inteligencia operacional de las empresas. Facilita la toma de decisiones en tiempo real en base a los datos actuales e históricos. Consta de una base de datos centralizada diseñada para almacenar millones de datos, tanto series de tiempo como datos basados en eventos. Dispone de herramientas que son capaces de analizar tanto la información en tiempo real como los datos pasados para descubrir información de interés sobre el funcionamiento de la planta. Es un producto utilizado por algunas de las empresas más importantes a nivel mundial, sobre todo del campo petroquímico, energético, etc.

El PI System consta de una serie de componentes que se comunican entre sí y facilitan la distribución de tareas y la flexibilidad y ampliación del sistema. Estos componentes y su interconexión se pueden ver en la Figura 4.

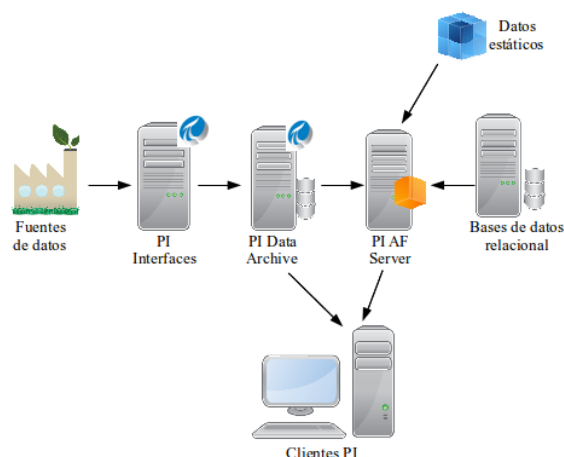


Figura 4: Componentes de un PI System

El PI System dispone de más de 400 interfaces para conectarse a fuentes de datos, siendo una de las más populares la interfaz de conexión a OPC DA [14], que será la que utilizemos en nuestro proyecto. Tal y como se ha comentado en la sección anterior, el simulador azucarero de planta completa está estructurado como un conjunto de servidores OPC, donde cada uno de ellos representa una parte de la factoría, y que son coordinados entre sí por un componente de nivel superior. Esto facilita que el PI System recoja las variables de interés del simulador vía OPC en tiempo real y las almacene internamente.

Una vez que los datos fluyen hacia el PI System, estos son almacenados en un servidor llamado Data Archive. Existe otro servidor llamado AF (Asset Framework) que estructura de forma conveniente tanto los datos dinámicos provenientes del Data Archive como datos estáticos y otras fuentes como tablas de bases de datos relacionales, ficheros de hojas de cálculo, etc.

Una de las ventajas del servidor AF es que, además de estructurar y fusionar la información de múltiples fuentes, es capaz de realizar análisis históricos sobre los datos, por ejemplo, tiempos de operación de unidades o equipos, disponibilidad de los mismos, rendimientos, análisis de calidad, etc, y ofrecer estos resultados como nuevos datos disponibles a los clientes. Además, incluye detección de eventos y notificaciones.

Finalmente, dentro de la estructura general, existirán diversos tipos de clientes que harán uso tanto de los datos en bruto, como los estructurados o los resultados de los análisis. Los más conocidos dentro del ecosistema de Osisoft serían ProcessBook y Coresight (ahora llamado Visio) que permiten construir interfaces gráficas de visualización, y DataLink para enlazar con MS Excel.

Pero si queremos realizar cálculos avanzados sobre los datos, un complemento perfecto sería usar la versatilidad y potencia algorítmica de las diversas librerías construidas sobre Matlab [6]. Las posibilidades de comunicación entre ambos sistemas son variadas [10], cada una con sus ventajas y sus inconvenientes; nosotros hemos optado en principio por usar la interfaz PI Web API que ofrece el PI System, por su carácter estándar y abierto (funciona en todos los sistemas operativos, se comunica vía HTTP y se basa en el formato JSON [1]). De esta forma, una visión simplificada de la comunicación entre los diversos elementos la podemos ver en la Figura 5. Aunque en nuestro caso planteemos Matlab como medio de desarrollo de algoritmos, es posible utilizar otros entornos o lenguajes de programación de propósito general.

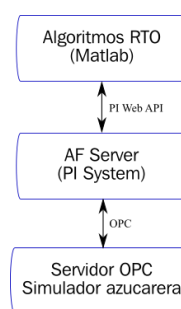


Figura 5: Esquema de comunicación

4 DESARROLLO ACTUAL

Tal y como se ha comentado en la sección 1, el simulador azucarero de planta completa ya fue desarrollado en trabajos anteriores en el entorno EcosimPro® [5] y desplegado como una simulación distribuida encapsulada en varios servidores OPC, cada uno de ellos correspondiente a una sección de la factoría y coordinados entre sí por un supervisor de nivel superior.

Si subimos de nivel, según la Figura 5, el siguiente paso sería llevar los datos del simulador al PI System. Para ello, fue necesario realizar los siguientes pasos:

1. Configurar los servidores OPC correspondientes al simulador para su correcta conexión remota por parte del PI System. Esto involucra configurar adecuadamente los parámetros de seguridad DCOM de los servidores.
2. Configurar una nueva interfaz PI para OPC desde la herramienta Interface Configuration Utility del PI System.
3. Crear los puntos PI en el servidor del PI System. Dado que se trataba de miles de variables, se realizó de forma semi-

automática a través de una combinación de un script en Matlab y el PI DataLink en Excel.

4. Crear la estructura de elementos en el servidor AF, con ayuda de plantillas en aquellos casos donde aparecen elementos del mismo tipo (controladores PID, evaporadores, turbinas, depósitos, etc.).

Actualmente, se ha completado en el servidor AF la configuración de la sección de evaporación, calderas y turbinas, y Tacha I del cuarto de azúcar (Figura 6).

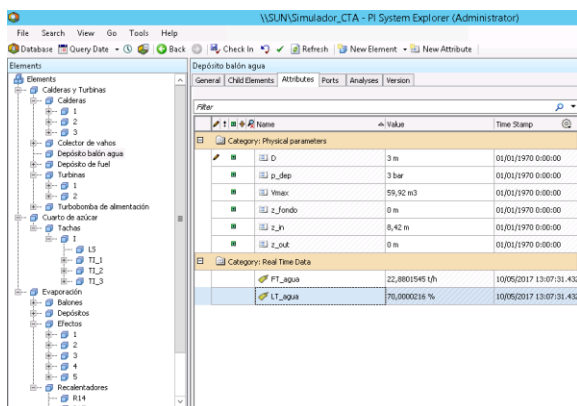


Figura 6: Estructura en el servidor AF

Como se puede ver en dicha figura, la estructura de elementos en forma de árbol permite acceder fácilmente a cada uno de ellos para ver sus atributos, tanto estáticos (por ejemplo, parámetros de construcción) como dinámicos (variables provenientes de los transmisores disponibles en planta).

Una vez que los datos están disponibles en el servidor AF, y siguiendo con el esquema de la Figura 5, nos quedaría establecer la comunicación con el entorno donde estén implementados los algoritmos RTO. Como se comentó en la sección anterior, uno de los métodos más versátiles para ello es el uso de la PI Web API. Para mostrar su facilidad de uso, se muestra en la Figura 7 el esquema básico con la información de entrada requerida por la función webread de Matlab y el resultado como estructura JSON. En la Figura 8 mostramos el resultado de la ejecución en Matlab cuando requerimos el nivel de uno de los depósitos de la sección de evaporación.

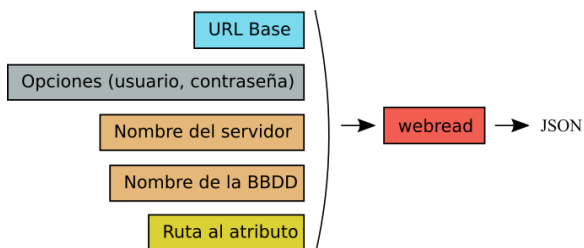


Figura 7: Uso de la función webread de Matlab

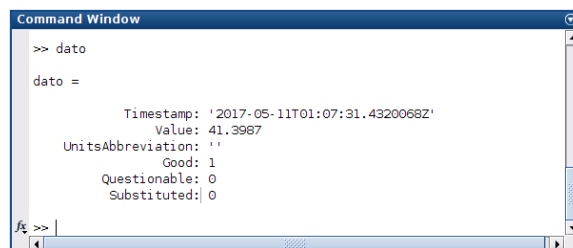


Figura 8: Obtención del dato actual en el PI System desde Matlab

5 PLANTEAMIENTO DE LOS ALGORITMOS RTO

Además de completar la configuración del servidor AF añadiendo el resto de secciones del simulador azucarero: Difusión y Secadero, Depuración, Tachas II, Tachas Tercera, Tacha Continua, Tacha Magma, Centrifugas y Refundidora, se deben desarrollar e implementar diversos algoritmos RTO que permitan mejorar la eficiencia energética de la factoría azucarera.

Se pretende así realizar una herramienta de optimización de la producción de una planta azucarera, que cuenta con un sistema de cogeneración asociado para autoabastecerse energéticamente y con la posibilidad de generar energía eléctrica para el exterior. La planificación de la producción deberá tener en cuenta los costes de la energía, de forma que una función de beneficio económico, sujeta a unas restricciones dinámicas, tenga el mayor valor posible. En la Figura 9 puede observarse un esquema básico del sistema asociado al problema de optimización/planificación.

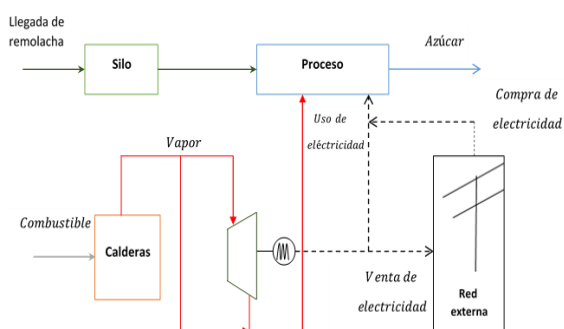


Figura 9: Esquema del proceso

La optimización además deberá cumplir diversas restricciones relacionadas con el proceso y su viabilidad, y otras aplicadas desde la UE a este tipo de procesos, que exigen altos índices de eficiencia energética a la hora de producir energía eléctrica.

Para poder llevar a cabo la optimización en tiempo real teniendo en cuenta la dinámica del proceso, se

necesitarán modelos dinámicos reducidos que relacionen la cantidad de remolacha a tratar en la fábrica con el consumo energético de la misma. Una vez obtenidos los modelos reducidos y el RTO en su conjunto, se procederá a probarlo en el simulador descrito en el apartado 2.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha mostrado el esquema de una infraestructura para RTO donde se hace uso de un sistema de gestión de datos de ámbito industrial que amplía el abanico de posibilidades de cara a la explotación y análisis de dichos datos. Debido a su carácter abierto, los algoritmos RTO a desarrollar en entornos de programación más potentes, como por ejemplo Matlab, pueden acceder a dicha información de forma eficiente. Aquí estaríamos hablando no solamente de datos en tiempo real, sino también de los datos de análisis de interés generados por el propio sistema gestor de datos.

Aún queda lo más interesante: probar la efectividad de diversos algoritmos RTO con los que conseguir una gestión energética más eficiente en la factoría azucarera. Pero, por el momento, la infraestructura que haga posible estas pruebas está ya preparada.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Ministerio de Economía y Competitividad y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del proyecto DPI2015-70975-P.

Referencias

- [1] Colaboradores de Wikipedia, "JSON," Wikipedia, La enciclopedia libre, <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=JSON&oldid=98972971> (acceso 11 de mayo de 2017).
- [2] de Prada, C., (2015) "Overview: Control hierarchy of large processing plants.", *Encyclopedia of Systems and Control* · Article ID: 366985 · Chapter ID: 241 Springer Verlag London, Edt. J. Baillieul, T. Samad, 10.1007/978-1-4471-5058-9_241.
- [3] de Prada, C., Gutierrez, G., (2012) "Present and future trends in process control", *Ingeniería Química, edición especialACHEMA*, ISSN: 0210-2064, nº 505, año XLIV, pp.38-42.
- [4] de Prada, C., Mazaeda, R., Acebes F., Rueda, A., Merino, A., (2012) "Sugar factory simulator for operators training", 7th Symposium on Advances in Control Education ACE2006, IFAC.
- [5] Empresarios Agrupados, EcosimPro, <http://www.ecosimpro.com> (acceso 12 de mayo de 2017).
- [6] Mathworks, Matlab, <http://es.mathworks.com> (acceso 12 de mayo de 2017).
- [7] Merino, A., Acebes, L.F., Mazaeda, R., de Prada, C., (2009) "Modelado y Simulación del Proceso de Producción del Azúcar", *RIAI*, vol. 6, nº 3, pp. 21-31.
- [8] Merino, A., Mazaeda, R., Alves, R., Rueda, A., Acebes, L.F., de Prada, C., (2006) "Sugar factory simulator for operators training", *Advances in Control Education*, pp. 259-264.
- [9] OPC Foundation, Home Page, <http://www.opcfoundation.org/> (acceso 17 de mayo de 2017).
- [10] Osisoft, LLC, (2014) "White Paper - Using PI Data with MATLAB", <https://pisquare.osisoft.com/docs/DOC-1305> (acceso 11 de mayo de 2017).
- [11] Osisoft, PI System, <http://www.osisoft.com> (acceso 12 de mayo de 2017).
- [12] Santos, R.A., Normey-Rico, J.E., Gómez, A.M., Arconada, L.F.A., Moraga, C. de P., (2008) "Distributed continuous process simulation: An industrial case study", *Computers & Chemical Engineering*, 32, pp. 1195-1205. doi:10.1016/j.compchemeng.2007.04.022.
- [13] Santos, R.A., Normey-Rico, J.E., Gómez, A.M., de Prada Moraga, C. (2006), "EDUSCA (EDUCATIONAL SCADA): FEATURES AND APPLICATIONS", *IFAC Proceedings Volumes*, 39, pp 614-619. doi:10.3182/20060621-3-ES-2905.00105.
- [14] Zamarreño, J.M., (2010) "Acceso a datos mediante OPC", Editorial Andavira SL, Santiago de Compostela.

INFRAESTRUCTURA PARA ESTUDIAR ADAPTABILIDAD Y TRANSPARENCIA EN EL CENTRO DE CONTROL VERSÁTIL

Juan A. Bonache Seco, Jose A. López Orozco, Eva Besada Portas, Jesús M. de la Cruz
jabonache@ucm.es, jalo@ucm.es, ebesada@ucm.es, jmcruz@ucm.es
Universidad Complutense de Madrid

Resumen

En la actualidad, la proliferación de vehículos autónomos o tripulados de forma remota involucrados en misiones complejas que requieren cooperación entre ellos y, en algunos casos, la inclusión de vehículos heterogéneos en una misión, está ocasionando una evolución en las estaciones de control de tierra. Éstas, además de mostrar los datos de forma clara, deben contar con una serie de mecanismos que faciliten la labor del operador mitigando su carga de trabajo y nivel de estrés.

En este trabajo, se describe un Centro de Control Versátil (CCV) que cuenta con una arquitectura distribuida y la infraestructura necesaria para implementar y experimentar los conceptos de Adaptabilidad (que permite al interfaz gráfico reubicar y alterar el aspecto de los elementos gráficos que se muestran en pantalla) y Transparencia (que permite reducir el nivel de estrés del operador disminuyendo el número de elementos en los que tiene que centrar su atención).

Palabras clave: Estación de Control de Tierra (Ground Control Station - GCS), Centro de Control Versátil, Monitorización y Supervisión, Adaptabilidad, Transparencia, Vehículos Autónomos (UAV, USV, UGV)

1. INTRODUCCIÓN

El ámbito de aplicación de los vehículos autónomos o no tripulados crece diariamente, realizando cada vez tareas más diversas. En algunas ocasiones, dichas tareas pueden ser realizadas por un sólo vehículo [1, 2, 3]. En otras alcanzan un nivel de complejidad que obliga a dividir las sub-tareas que se asignan a un equipo cooperativo de vehículos que puede ser: homogéneo, en el caso de que todos los vehículos implicados sean de la misma naturaleza (aérea, marítima o terrestre) o heterogéneo [4, 5]. Este tipo de misiones suele implicar el desarrollo de un software para la estación de control de tierra (Ground Control Station - GCS) muy específico, en el que su modificación para otros tipos de misión o un cambio en el equi-

po de vehículos puede resultar muy costosa.

Podemos encontrar múltiples ejemplos de centros de control tanto en ámbito militar como civil, por ejemplo la Estación de Control de Tierra para Múltiples Entidades de Combate [6], el entorno ASMAC para múltiples vehículos submarinos [7], el sistema de vigilancia AMFIS capaz de fusionar y presentar datos de sensores de vehículos aéreos y terrestres [8], el Centro de Control para entornos marinos diseñado en el proyecto europeo MUNIN [9] y el Centro de Control inmersivo que incorpora nuevas tecnologías como la realidad virtual [10].

Además, si nos centramos en la monitorización y el control, cuanto mayor es la complejidad de la misión y el número de vehículos que participan, más alto es el número de datos que el operador debe visualizar, lo que acarrea un aumento del nivel de estrés y un descenso en la eficiencia del operador. Este problema se ha mitigado, por un lado, aplicando el concepto de Transparencia [11, 12], que consiste en ocultar elementos visuales que se consideran de menor importancia con el objetivo de liberar parte de la carga del usuario. Por otro, para potenciar la ergonomía de los elementos gráficos (posición, tamaño, color, etc.) se utiliza el concepto de Adaptabilidad [13, 14, 15, 16], consistente en modificar (adaptar) los elementos gráficos en tiempo de ejecución para su mejor comprensión por parte del usuario. Mejorar estos aspectos puede ser clave, ya que en los casos que exigen una rápida respuesta (p.e. emergencias) o a la hora de definir las misiones a realizar, la intervención de un humano cerrando el lazo de control [17] puede mejorar el experimento hasta un 50 %.

En la sección 2 de este artículo describiremos un Centro de Control Versátil (CCV) [18] con una arquitectura distribuida que permitirá: 1) reconfigurar la información que se muestra y cómo mostrarla (para cada vehículo y operador), 2) definir alarmas que se activen ante determinados eventos liberando de carga de trabajo al operador mientras dichos eventos no ocurran y 3) reasignar en tiempo real la gestión de los vehículos, pudiendo transferir el control de un operador a otro si se dan las condiciones adecuadas. Además se ha diseñado la infraestructura necesaria implemen-

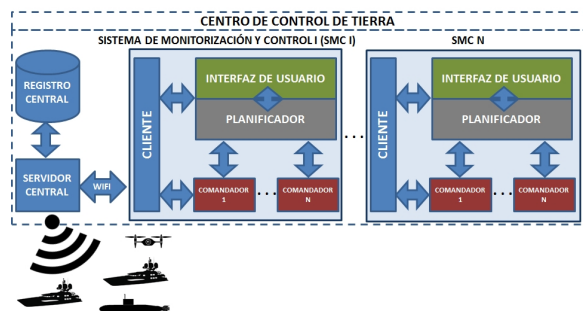


Figura 1: Arquitectura Distribuida del CCV

tar dos mecanismos adicionales: Adaptabilidad y Transparencia[19] que serán detallados en la sección 3. Finalizaremos con las conclusiones y trabajo futuro en la sección 4.

2. ARQUITECTURA DEL CENTRO DE CONTROL VERSÁTIL

Durante el desarrollo del proyecto SALACOM (Sistema Autónomo de Localización y Actuación ante Contaminantes en el Mar), se ha desarrollado un Centro de Control Versátil (CCV) que debe tener unas características muy concretas. Ha de ser fácilmente configurable para diferente tipo y número de vehículos (independientemente de su hardware y protocolos de comunicaciones), permitir que los vehículos trabajen de forma autónoma e incluir al operador humano en el lazo de control para tareas de supervisión. También debe ser capaz de modificar en tiempo real algunas de sus características como la visualización de los datos en base a criterios ergonómicos, preferencias del operador o tipo de misión, coordinación/control de vehículos y formaciones de los mismos, definición de maniobras y reorganización de recursos.

Estas características se logran mediante una arquitectura distribuida [18] que puede verse en la Figura 1 y que consta de cuatro módulos:

Servicio de Comunicaciones. Es el módulo encargado de gestionar todas las comunicaciones (datos de telemetría, consignas, operaciones de alto nivel, etc.) entre cualquiera de los módulos del centro de control y hacia los vehículos, por lo que es el único de los módulos con comunicación directa con los mismos. Se divide en tres componentes: Servidor Central, Cliente/Clientes y Registro Central.

Planificador. Es el módulo encargado de generar comandos de alto nivel para que los vehículos realicen trayectorias o misiones, que podrán diseñarse desde el entorno gráfico propio del Planificador o

desde el Interfaz de Usuario mediante la definición de puntos de paso o rutas predefinidas. Posteriormente estas trayectorias serán enviadas a los vehículos a través del Comandador (que generará las instrucciones de bajo nivel propias de cada vehículo) pasando por el Servicio de Comunicaciones. Además podrá calcular la ruta más adecuada en base a los puntos señalados por el operador en el mapa y generar trayectorias mediante curvas paramétricas (lemniscata, elipse, círculo, seno, etc.) que serán seguidas por el control de los vehículos utilizando diferentes métodos de control y guiado [20, 21, 22, 23, 24]. También hará reaccionar al vehículo ante alarmas recibidas de los vehículos.

Comandador. Es el módulo más próximo al vehículo y es propio a él (sólo habrá uno activo por vehículo). Su interfaz es específica para cada vehículo. Mostrará sus alarmas y banderas, que podrán habilitarse y deshabilitarse desde este módulo. También permite maniobras de ingeniería para comprobar el correcto funcionamiento del vehículo. Procesa las órdenes del Planificador o Interfaz de Usuario generando los comandos de bajo nivel y trasladándolos al Servicio de Comunicaciones para que las envíe al vehículo. Además deberá enviar una señal periódica que le indica al vehículo que hay un comandador activo para que no interrumpa su actividad.

Interfaz de Usuario. Permite al usuario visualizar el estado, situación en el mapa y datos de telemetría de cada uno de los vehículos involucrados en la misión e interactuar con otros módulos por medio de botones y menús. Permitirá al usuario llevar a cabo acciones como solicitar/renunciar el control de uno o más vehículos que este comandando, establecer rutas y puntos de acceso sobre el mapa (o elegir un fichero desde el que desee cargarlos), previsualizar dichas rutas y realizar algunos cambios sobre la disposición de los elementos para que se ajusten a los criterios ergonómicos del operador. Además permite al usuario definir alarmas tipo notificación.

3. ADAPTABILIDAD Y TRANSPARENCIA

Con el objetivo de mitigar la carga de trabajo y el estrés soportado por un operador que debe supervisar/controlar varios vehículos heterogéneos, se han implementado en el CCV dos mecanismos que ayudaran a paliar en la medida de lo posible los efectos negativos del exceso de información y el esfuerzo mental del operador. Por un lado, mediante la Adaptabilidad, se transformará el interfaz para dar prioridad a los elementos gráficos de mayor importancia y mostrarlos de forma más intuitiva y ergonómica. Por otro lado, gracias a la Transpa-

rencia se eliminarán de la interfaz (de forma momentánea o permanente, dependiendo de las necesidades de cada misión) los elementos gráficos menos relevantes, reduciendo así la carga de trabajo del operador.

3.1. ADAPTABILIDAD

Un software es Adaptativo cuando es capaz de cambiar en tiempo de ejecución algunas de sus características, tratando de mejorar una o varias facetas del trabajo para el que es utilizado, mejorando su propio funcionamiento u orientando dichos cambios a facilitar a un tercero (un usuario, otro programa con el que deba interactuar, etc.) las herramientas necesarias que le permitan realizar su labor de forma más eficiente.

3.1.1. ANTECEDENTES

Garlan et al. muestran como su framework adaptativo, RAINBOW [13], resulta útil en diferentes ámbitos de aplicación. Para ilustrarlo, describen un servicio web tipo cliente-servidor que debe adaptar los recursos disponibles (número de servidores y ancho de banda) ante la petición de contenido de los clientes para conseguir mejorar la experiencia de los usuarios. Otro ejemplo de que el framework puede aplicarse a problemas diferentes es un sistema de videoconferencia que implementa la misma estructura de módulos o capas pero que varía su comportamiento por medio de estrategias o algoritmos implementados en cada uno de los módulos que gobiernan el software.

Otro ejemplo de aplicación de Adaptabilidad bastante extendido es la distribución de recursos en redes inalámbricas enfocado a la mejora en la calidad del servicio (QoS - Quality of Service). Uno de los ejemplos que podemos encontrar es BAA (Bandwidth Adaptation Algorithm - Algoritmo de Adaptación de Ancho de Banda [25]), que expande o reduce dinámicamente el ancho de banda asignado a un bloque de llamadas entrantes cuando se produce algún cambio que lo invoca (llamada entrante, finalizada, rechazada, etc.). Otro ejemplo es el Sistema Adaptativo de Gestión de Calidad del Servicio (QoS) propuesto por Huang et al. [26] que distribuye dinámicamente los recursos disponibles en un entorno de comunicaciones inalámbrico y provee a los usuarios de servicios multimedia con una calidad que cumple con los requisitos especificados.

3.1.2. IMPLEMENTACIÓN EN EL CCV

En la sección anterior se han mostrado algunos problemas genéricos que han sido resueltos por medio de Adaptabilidad. Veamos a continuación

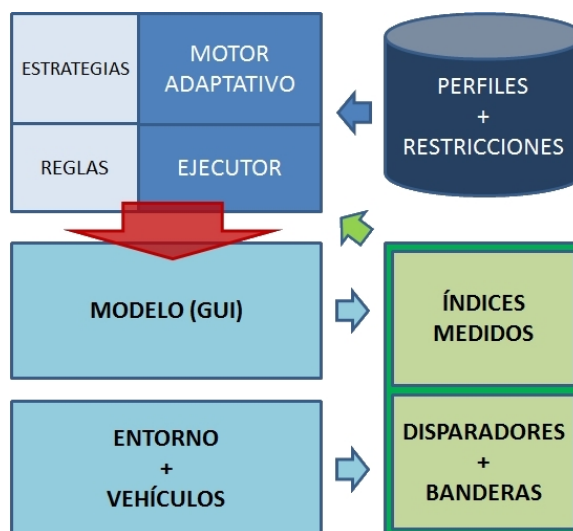


Figura 2: Arquitectura para Adaptabilidad del CCV

cómo podemos aplicarla al CCV para resolver algunos de los problemas planteados previamente.

Para ello se ha diseñado una infraestructura modular que permite a nuestro software modificarse dinámicamente para mejorar la eficiencia del operador. Los cambios se centran en dos vertientes, por un lado en mostrar los elementos necesarios dadas unas restricciones de espacio (como trataremos en la sección posterior dedicada a Transparencia) y por otro en mostrarlos por pantalla con una apariencia que vaya en consonancia con su importancia para el desarrollo de la misión (modificando posición, color y tamaño). Intuitivamente podemos establecer el paralelismo entre nuestras restricciones (espacio e importancia en la misión) y algunas de las mencionadas en ejemplos anteriores (por ejemplo ancho de banda y prioridad).

En muchos de los trabajos estudiados, se cuenta con una estructura similar que difiere en algunos bloques [27, 26], pero para el diseño del software del CCV se ha optado por una infraestructura semejante a la utilizada en RAINBOW [13, 16, 14, 15]. Dicha estructura, como podemos ver en la Figura 2, consta de cuatro bloques:

La Base de Datos (BD) de Perfiles y Restricciones. Se trata de un almacenamiento persistente donde se guardarán datos referentes al perfil de usuario del operador, que nos ayudarán a decidir la mejor estrategia para adaptar los elementos del Interfaz Gráfico. También se almacenan ciertas Restricciones del software referentes al Modelo, que hace referencia a la estructura del Interfaz Gráfico y cómo pueden alterarse los elementos en él.

El Bloque de Parámetros. Es un módulo que se encarga de tomar medidas sobre algunos índices re-

levantes referentes a la relación entre el Interfaz de Usuario y el Operador (tiempo de reacción, estrés, preferencias gráficas modificables, etc.) y otros disparadores o banderas referentes al entorno (viento, corrientes marítimas, etc.) o a los vehículos (nivel de batería, datos de telemetría, status de la misión, etc.) que serán externos al software del CCV. Estos datos son recibidos por el Motor Adaptativo junto a los datos de perfil y restricciones almacenados en la BD y sirven como condiciones para disparar el mecanismo de Adaptabilidad y como parámetros para elegir la mejor estrategia o algoritmo a aplicar en la adaptación.

El *Modelo*. Es la representación del Interfaz Gráfico y las reglas sobre cómo pueden mostrarse todos los elementos en su interior. Para ello, en el Interfaz de Usuario se cuenta con un bloque para elementos gráficos por cada vehículo dentro del cual se reordenarán y cambiarán de apariencia en base a los datos recibidos del Bloque de Parámetros. También encontramos información sobre los vehículos autónomos que forman parte de la misión y algunos datos relevantes sobre el entorno en el que se va a actuar.

El *Motor Adaptativo*. Es el bloque más importante ya que se encarga de almacenar las Estrategias o algoritmos (pueden estar formadas por subestrategias o Tácticas si éstas son complejas y es conveniente dividir las) y las reglas en base a las cuales el bloque Ejecutor adaptará los elementos gráficos del Modelo.

3.1.3. FUNCIONAMIENTO

A continuación describiremos un ejemplo de funcionamiento del mecanismo de Adaptabilidad aplicado a una de las maniobras de seguimiento realizadas por los barcos del proyecto SALACOM, en la que el barco líder (en azul) traza una trayectoria programada y el barco seguidor (en rojo) debe escoltarle a una distancia fijada previamente.

Se parte, en un instante dado de la misión, de la configuración de la Figura 3. Podemos ver los bloques de elementos pertenecientes a cada barco, el líder (izquierda, con borde azul) y el seguidor (derecha, borde rojo). Para este experimento se ha determinado que las posiciones de más peso son las superiores y los elementos se irán colocando hacia abajo cuanto menor sea su prioridad. Las posiciones de mayor prioridad pueden definirse en el software para cada operador, basándonos en sus preferencias personales y criterios ergonómicos almacenados en su perfil dentro de la *BD de Perfiles y Restricciones*.

En la Figura 3 se observa que la velocidad de ambos barcos se sitúa en un segundo plano ya que es

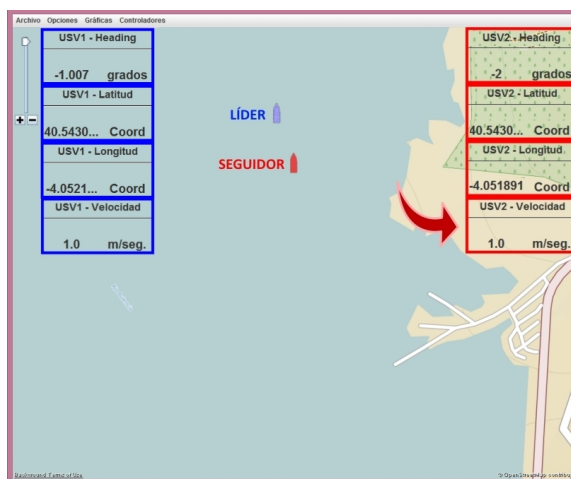


Figura 3: Funcionamiento de Adaptabilidad 1

constante durante este tramo de la maniobra, que dura varios minutos. Al cabo de este tiempo, el barco seguidor aumenta la distancia programada respecto al líder, lo que activa en su controlador un aumento de la velocidad para reestablecer la distancia correcta. El aumento de velocidad, activa un disparador en el *Bloque de Parámetros*, inmediatamente transmitido al *Motor Adaptativo* que, por medio de su bloque *Ejecutor* transmite el cambio al *Modelo* o Interfaz Gráfico.

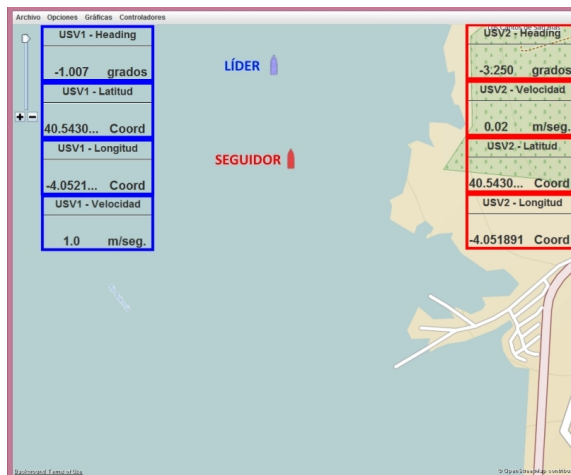


Figura 4: Funcionamiento de Adaptabilidad 2

En la Figura 4 vemos que el elemento gráfico que representa la velocidad del barco seguidor ha escalado puestos hacia una posición de mayor prioridad. Esto sucede porque el disparador y los datos de telemetría, enviados al *Motor Adaptativo* le han indicado que un dato que anteriormente permanecía constante (la velocidad) ha sufrido un cambio brusco, por lo que se considera importante que el operador sea consciente de dicho cambio y en consecuencia el elemento debe moverse a una posición en la que lo pueda ver mejor. Adicional-

mente, si llegase a un valor considerado crítico, se dispararía también una Alarma visual y/o auditiva para atraer definitivamente la atención del usuario.

3.2. TRANSPARENCIA

La Transparencia aplicada al software se basa en la capacidad del programa para mostrar menos información haciendo el proceso más “transparente” al usuario para que su labor sea más rápida y fácil, pero sin que el nivel de confianza que tiene en el programa se vea afectada, ya que lo normal es que se tenga más confianza cuanto más información esté disponible.

3.2.1. ANTECEDENTES

Los Centros de Control de Tierra deben mostrar una buena cantidad de datos pertenecientes a los vehículos monitorizados, a la misión que están realizando y al entorno en el que dicha misión se está desarrollando. Cuando las misiones implican equipos de vehículos, los datos a mostrar crecen prácticamente de forma exponencial y éstos son más complicados de interpretar por parte del operador si los vehículos son de naturaleza heterogénea. Debemos plantearnos, pues, varias cuestiones como: si el espacio en pantalla es suficiente para mostrar todos los datos monitorizados y, suponiendo que lo fuese, si es realmente relevante tener disponibles todos estos datos de forma continua.

El objetivo es, por lo tanto, lograr un equilibrio mostrando los datos suficientes para que el operador conozca todos los detalles relevantes sobre la misión y los vehículos, pero sin que lleguen a provocar un aumento considerable en el nivel de carga de trabajo o de estrés sobre el operador. A esto, debemos añadirle el *nivel de confianza* del usuario en el software, que puede disminuir si se eliminan demasiados datos de su campo de visión, ya que si el usuario no puede determinar rápidamente en qué estado está un vehículo en un momento dado, puede aumentar su nivel de incertidumbre acerca de la correcta realización de la misión. En esta línea, Mercado et al. [12] realizan un estudio sobre un grupo heterogéneo de operadores sobre el que se mide: rendimiento, carga de trabajo y nivel de confianza en el software, alternando entre 3 niveles de transparencia: N1, en el que sólo se muestra información básica sobre los vehículos y el camino que seguirán durante la misión, N2 que mostrará la información del N1 y algunos datos sobre las decisiones de la Inteligencia Artificial (IA) del software y N3 que mostrará la información de los niveles anteriores y algunos datos sobre aspectos de la misión que pueden producir incertidumbre. De este estudio se extrae que el rendimiento del ope-

rador y su nivel de confianza aumentan cuantos más datos se muestran, mientras que el estrés y la carga de trabajo no aumentan significativamente.

Sin embargo, Mercado et al. basan su estudio en un software de planificación que ayuda a tomar decisiones sobre la misión al operador, mientras que nuestro problema se basa en las dificultades que acarrea la monitorización y control de un equipo cooperativo de vehículos autónomos. En este tipo de misiones, por nuestra experiencia en experimentos de campo con los barcos del proyecto SALACOM en el pantano de El Atazar, hemos comprobado que en ocasiones el operador se ve sobrepasado por la cantidad de datos a monitorizar y, en caso de ser necesario el envío de consignas a los vehículos en momentos puntuales, resulta complicado si hay que hacerlo a más de uno simultáneamente.

3.2.2. IMPLEMENTACIÓN EN EL CCV

Debido a las razones descritas anteriormente, se ha decidido implementar en el CCV dos mecanismos con objeto de mitigar el exceso de carga de trabajo y el estrés que puede acarrear para el operador la concurrencia de varios vehículos cooperando en una misión.

El primero consiste en la solución más intuitiva, delegar tareas. Aprovechando la arquitectura distribuida descrita en la sección 2, se dividirán las tareas de supervisión y comando de los vehículos en tiempo de ejecución. De esta forma el software gana una gran flexibilidad permitiendo al operador transferir a otros operadores las tareas que no se sienta capaz de realizar en un momento dado. Para ello el operador debe indicarle al CCV que desea delegar una tarea, por ejemplo el control de uno de los barcos, por medio del menú de opciones del *Interfaz Gráfico*, que le mandará la orden al *Servicio de Comunicaciones*, donde se comprobará que la transferencia puede realizarse sin peligro, revisando la disponibilidad y otras restricciones en el *Servidor Central*. Una vez comprobado que se cumplen todos los requisitos, se enviará una notificación al operador que se desea transferir las tareas y éste deberá aceptarlas (ya que no tendría sentido transferirle tareas a un Operador que ya está muy ocupado). Si el segundo operador acepta, el sistema realiza la transición de forma que el vehículo no quede incomunicado en ningún momento.

En segundo lugar, se ha implementado entre las estrategias de Adaptabilidad del CCV un sistema de Transparencia que nos permitirá ocultar ciertos componentes gráficos del Interfaz de usuario cuando no sean relevantes. Este mecanismo, como podemos ver en la Figura 5 se modeliza mediante

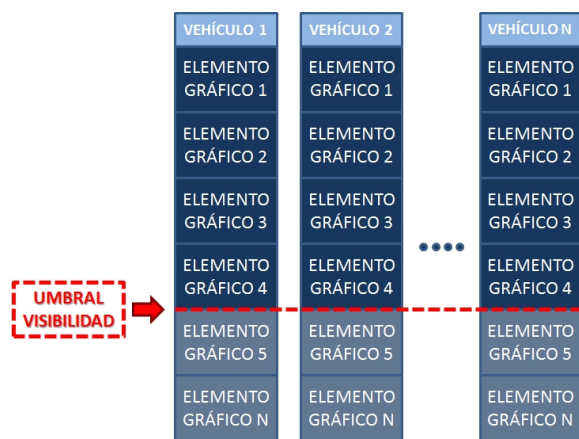


Figura 5: Esquema de Vectores de Visibilidad para Transparencia

dos elementos:

Los *Vectores de Visibilidad*. Se trata de un array de elementos gráficos donde se almacenarán ordenados de mayor a menor prioridad (un elemento gráfico con mayor prioridad tendrá más importancia y por tanto tendrá más probabilidad de ser mostrado en pantalla) todos los elementos que representen datos recibidos de un vehículo. Por lo tanto, cada uno de estos vectores corresponde a uno de los grupos de elementos gráficos donde se muestran los datos de un vehículo. La prioridad de los elementos variará en tiempo de ejecución en base a los datos recibidos por el *Motor de Adaptabilidad*, que decide cuándo se deben reordenar los elementos mediante la estrategia establecida para ello en ese momento o por algún disparador recibido de los datos de una misión, vehículo o bajo demanda del operador.

Los *Umbral de Visibilidad*. Indican a cada *Vector de Visibilidad* cuántos elementos deben mostrarse por pantalla. Este número puede variar por las razones mencionadas anteriormente. Por ejemplo, si se detecta que el usuario está sobrecargado, se puede optar por disminuir el número de elementos a mostrar para que su carga de trabajo de monitorización disminuya. Por el contrario, si la carga de trabajo o el nivel de estrés del usuario disminuye, el *Umbral de Visibilidad* aumentará permitiendo al *Interfaz Gráfico* mostrar un mayor número de elementos de cada vehículo.

Los valores asignados a cada elemento gráfico, como hemos comentado anteriormente, pueden variar durante el desarrollo de la misión. Algunos ejemplos de estos valores pueden ser: la *prioridad*, que indica la importancia del elemento gráfico para este vehículo y misión; el *coste* de mostrar el elemento en pantalla y el *valor* que el usuario le otorga a ver dicho elemento. Como es posible que

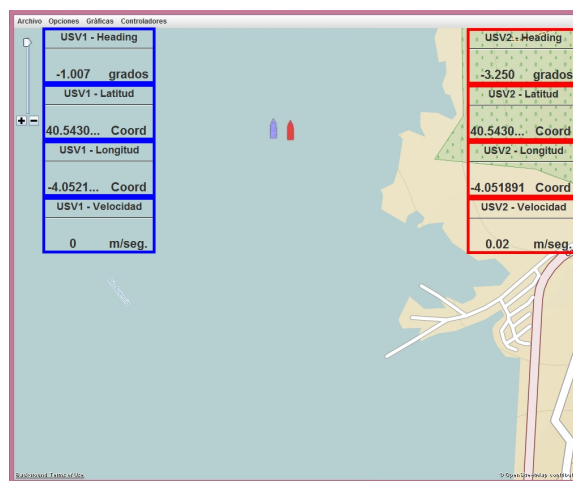


Figura 6: Funcionamiento de Transparencia 1

durante el transcurso de la misión al operador le resulte necesario algún elemento gráfico no visible en ese momento, se podrá elegir cualquiera de ellos mediante un menú desplegable del *Interfaz Gráfico* para mostrarlo instantáneamente.

3.2.3. FUNCIONAMIENTO

Un ejemplo de funcionamiento de Transparencia en el CCV puede ilustrarse con una misión de localización en la que los barcos pararán momentáneamente y un cuatrirrotor autónomo (UAV - Unmanned Aerial Vehicle) despegará desde una plataforma en el barco líder para realizar un vuelo de reconocimiento.

Se parte de la configuración mostrada en la Figura 6, en la que los dos barcos han acudido a un punto de ruta que se les ha indicado desde el *Planificador*. Durante la aproximación al punto de ruta, sólo se monitorizan los dos barcos ya que el cuatrirrotor está parado en la plataforma del barco líder, por lo que se pueden mostrar hasta cuatro elementos relevantes referentes a cada uno de los barcos. Al llegar al punto señalado ambos vehículos se paran y el cuatrirrotor despegue.

En la Figura 7 vemos la siguiente fase de la maniobra, en la que ambos barcos ya están parados y el cuatrirrotor ha despegado, por lo que aparece su bloque de elementos gráficos (abajo, en negro). Al *Motor Adaptativo* le llegan los datos relativos a la misión, número de vehículos y el usuario desde la *BD de Perfiles y Restricciones* y el *Bloque de Parámetros* y mediante el algoritmo que se haya elegido como estrategia, cambiará el *Umbral de Visibilidad* de los barcos que, al estar parados, tienen menos datos relevantes a monitorizar (la posición). En este caso se fija el Umbral para los barcos en 2 y el del cuatrirrotor en 4, pudiendo monitorizar todos los datos necesarios para cono-

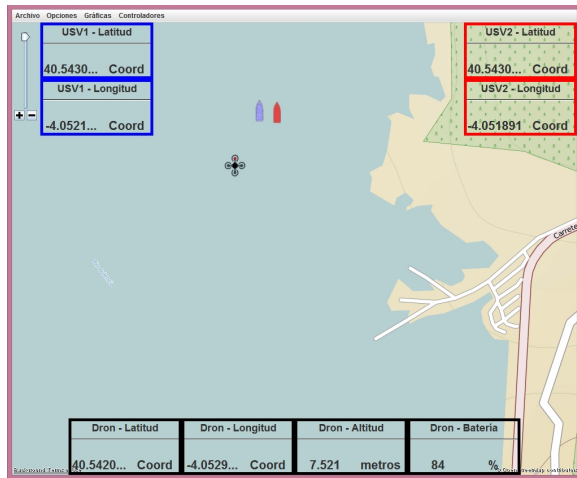


Figura 7: Funcionamiento de Transparencia 2

cer su estado y situación en la misión.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se ha diseñado un Centro de Control Versátil reconfigurable que cuenta con una arquitectura distribuida que, además de encapsular algunos aspectos de la codificación de datos y comunicaciones (facilitando la reutilización de cada uno de los módulos que la forman), otorga una mayor flexibilidad a la hora de monitorizar y comandar los vehículos implicados en cada misión (permitiendo la redistribución de recursos entre operadores en tiempo real).

Además se ha dotado al Software de una infraestructura lo suficientemente robusta y flexible para implementar y realizar experimentos sobre los dos conceptos descritos, Adaptabilidad y Transparencia. Esto añade valor a nuestro CCV y tiene el objetivo de facilitar la labor del usuario reubicando y cambiando el aspecto de los elementos gráficos del Interfaz de Usuario o incluso ocultando algunos de menor relevancia momentáneamente, reduciendo así la carga de trabajo que el operador debe soportar.

Actualmente se está trabajando en la implementación de diferentes algoritmos que formen las Estrategias y Tácticas para el *Motor Adaptativo* y de esta forma poder probar cuáles se ajustan mejor a las necesidades de los operadores y las misiones en el proyecto SALACOM. También se está trabajando en fusionar las medidas, tanto de estado [28] como de entorno [29] de los vehículos para obtener una estimación más precisa y completa en la detección de obstáculos potenciales o a la hora de actuar de forma reactiva en el caso de colisión inminente.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte bajo el proyecto DPI2013-46665-C2.

Referencias

- [1] Patterson, M. C., Mulligan, A., and Boiteux, F. (2013) Safety and security applications for micro-unmanned surface vessels. *2013 OCEANS-San Diego*, pp. 1–6, IEEE.
- [2] Ribas, D., Palomeras, N., Ridao, P., Carerras, M., and Mallios, A. (2012) Girona 500 auv: From survey to intervention. *IEEE ASME Transactions on Mechatronics*, **17**, 46–53.
- [3] Sutton, R., Sharma, S., and Xiao, T. (2011) Adaptive navigation systems for an unmanned surface vehicle. *Journal of Marine Engineering & Technology*, **10**, 3–20.
- [4] Murphy, R. R., Steimle, E., Griffin, C., Cullins, C., Hall, M., and Pratt, K. (2008) Cooperative use of unmanned sea surface and micro aerial vehicles at hurricane wilma. *Journal of Field Robotics*, **25**, 164–180.
- [5] Lindemuth, M., et al. (2011) Sea robot-assisted inspection. *IEEE robotics & automation magazine*, **18**, 96–107.
- [6] Heo, J., Kim, S., and Kwon, Y. (2016) Design of ground control station for operation of multiple combat entities. *Journal of Computer and Communications*, **4**, 66–71.
- [7] Mupparapu, S. S., Chappell, S. G., Komerska, R. J., Blidberg, D. R., Nitzel, R., Benton, C., Popa, D. O., and Sanderson, A. C. (2004) Autonomous systems monitoring and control (asmac)-an auv fleet controller. *Autonomous Underwater Vehicles, 2004 IEEE/OES*, pp. 119–126, IEEE.
- [8] Bürkle, A., Segor, F., Kollmann, M., and Schönbein, R. (2011) Universal ground control station for heterogeneous sensors. *Journal On Advances in Telecommunications, IA-RIA*, **3**, 152–161.
- [9] Burmeister, H.-C., Bruhn, W., Rødseth, Ø. J., and Porathe, T. (2014) Autonomous unmanned merchant vessel and its contribution towards the e-navigation implementation: The munin perspective. *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, **1**, 1–13.

- [10] Walter, B. E., Knutzon, J. S., Sannier, A. V., and Oliver, J. H. (2004) Virtual uav ground control station. *AIAA 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference, Workshop and Exhibit*.
- [11] Chen, J., Procci, K., Boyce, M., Wright, J., Garcia, A., and Barnes, M. (2014) Situation awareness-based agent transparency(no. arl-tr-6905).
- [12] Mercado, J. E., Rupp, M. A., Chen, J. Y. C., Barnes, M. J., Barber, D., and Procci, K. (2016) Intelligent agent transparency in human-agent teaming for multi-UxV management. *Human Factors*, **58**, 401–415.
- [13] Garlan, D., Cheng, S.-W., Huang, A.-C., Schmerl, B., and Steenkiste, P. (2004) Rainbow: Architecture-based self-adaptation with reusable infrastructure. *Computer (IEEE Computer Society)*, **7** (Issue: 10), 48–54.
- [14] Cheng, S.-W., Garlan, D., and Schmerl, B. (2006) Architecture-based self-adaptation in the presence of multiple objectives. *SEAMS 06 Proceedings of the 2006 international workshop on Self-adaptation and self-managing systems*, pp. 2–8.
- [15] Cheng, S.-W. and Garlan, D. (2007) Handling uncertainty in autonomic systems. *Automated Software Engineering - ASE 07*.
- [16] Cheng, S.-W., Huang, A.-C., Garlan, D., Schmerl, B., and Steenkiste, P. (2004) Rainbow: Architecture-based self-adaptation with reusable infrastructure. *Proceedings of the International Conference on Autonomic Computing (ICAC 04)*, pp. 276 – 277.
- [17] Cummings, M. L., How, J. P., Whitten, A., and Toupet, O. (2012) The impact of human–automation collaboration in decentralized multiple unmanned vehicle control. *Proceedings of the IEEE*, **100**, 660–671.
- [18] Bonache Seco, D. C. J. M. M. L.-O. J. B. P. E. d. l. C. G. J., J.A. (2017) Centro de control de tierra para colaboración de vehículos autónomos marinos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI)*.
- [19] Bonache Seco, J. A., López Orozco, J. A., Besada Portas, E., and de la Cruz, J. M. (2016) Centro de control versátil: Estado actual y evolución hacia la adaptabilidad. pp. 979–986, CEA.
- [20] Lapierre, L. and Soetanto, D. (2007) Nonlinear path-following control of an auv. *Ocean engineering*, **34**, 1734–1744.
- [21] Park, S., Deyst, J., and How, J. P. (2007) Performance and lyapunov stability of a nonlinear path following guidance method. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, **30**, 1718–1728.
- [22] de la Cruz, J. M., Lopez-Orozco, A. J., Besada Portas, E., and Aranda Almansa, J. (2016) Control de formaciones de vehículos marinos de superficie con restricciones de entrada. pp. 1044–1051, CEA.
- [23] de la Cruz, J. M., Lopez-Orozco, A. J., Besada Portas, E., Moreno Salinas, D., and Aranda Almansa, J. (2014) Seguimiento de caminos para formaciones de vehículos marinos de superficie.
- [24] de la Cruz, J. M., Lopez-Orozco, J. A., Besada-Portas, E., and Aranda-Almansa, J. (2015) A streamlined nonlinear path following kinematic controller. *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 6394–6401, IEEE.
- [25] Naghshineh, T. K. . S. K. . Y. C. . M. (2000) Threshold-type call admission control in wireless/mobile multimedia networks using prioritised adaptive framework. *Electronics Letters IEEE 2000*, **36**, 852–854.
- [26] Kuo, L. H. S. K. C.-C. (2004) Adaptive resource allocation for multimedia qos management in wireless networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **53**, 547–558.
- [27] Oreizy, P., Gorlick, M. M., Taylor, R. N., Heimbigner, D., Johnson, G., Medvidovic, N., Quilici, A., Rosenblum, D. S., and Wolf, A. L. (1999) An architecture-based approach to self-adaptive software.
- [28] Besada-Portas, E., Lopez-Orozco, J. A., Besada, J., and Jesus, M. (2011) Multisensor fusion for linear control systems with asynchronous, out-of-sequence and erroneous data. *Automatica*, **47**, 1399–1408.
- [29] Besada-Portas, E., Lopez-Orozco, J. A., and de la Cruz, J. (2002) Unified fusion system based on bayesian networks for autonomous mobile robots. *Information Fusion, 2002. Proceedings of the Fifth International Conference on*, vol. 2, pp. 873–880, IEEE.

ARQUITECTURA DE CONTROL HÍBRIDA PARA LA NAVEGACIÓN DE VEHÍCULOS SUBMARINOS NO TRIPULADOS

Francisco J. Lastra^(a), Jesús A. Trujillo^(b), Francisco J. Velasco^(a), Elías Revestido^(a).

^(a) C/ Gamazo 1, E. T. S. de Náutica, 39004, Santander, Universidad de Cantabria,
e-mail: fjlastra@teisa.unican.es, velascof@unican.es, revestidoe@unican.es.

^(b) C/Avda. de Fuencarral, 44, Madrid, Iberalter, e-mail:info@iberalter.es.

Resumen

En el presente trabajo, se propone una arquitectura híbrida basada en sistemas multi-agentes en capas. Esta arquitectura presenta cualidades de modularidad y escalabilidad. También se desarrolla una metodología para el seguimiento de trayectorias basado en la generación de un espacio virtual fiable, en el que la navegación se lleva a cabo en condiciones operativas de seguridad y eficacia. Se espera obtener una reducción en el tiempo de procesamiento de operaciones durante la inspección.

Palabras clave: Arquitectura de control híbrida, modularidad, escalabilidad, sistemas supervisores.

1 Introducción

Los sistemas subacuáticos autónomos no tripulados han atesorado un aumento en su autonomía durante la última década [6], tanto desde el punto de vista del suministro de energía como del punto de vista de la capacidad de decisión. Esta autonomía permite la posibilidad de realizar aplicaciones fiables y seguras con este tipo de sistemas.

La inclusión de sistemas robotizados en el entorno subacuático es muy compleja, principalmente debido a un comportamiento dinámico variable e impredecible del entorno que tiene un impacto significativo en las diferentes actividades que pueden llevarse a cabo. Una de estas actividades complejas, es la inspección de cables submarinos [7, 2], debido a la dificultad de operar en un ambiente hostil. Esto constituye una línea de investigación de interés creciente.

Los sistemas de inspección para cables submarinos han evolucionado con el desarrollo de sistemas robóticos bajo el agua. La tendencia operativa submarina convencional se puede dividir en dos grupos: uno es la inspección submarina del cable por buceadores y otro es la inspección usando vehículos submarinos autónomos. El primero es el más arriesgado, ya que los buzos están expuestos a los peligros inherentes a las altas profundidades. Este último se realiza mediante el uso de

vehículos submarinos que ayudan a un operador humano en una operación peligrosa. Básicamente, los vehículos submarinos [13] desarrollan tareas de localización y posicionamiento, con el fin de mejorar la inspección de cables submarinos a través de sistemas de visión bajo el agua (visión estéreo).

Debido a la alta complejidad de estas aplicaciones es esencial, su desarrollo bajo el amparo una arquitectura de control que contiene implícitamente características de modularidad y escalabilidad, que permiten transacciones entre niveles de arquitectura. Hoy en día los sistemas autónomos no tripulados tienen altas restricciones para realizar estas acciones de inspección. Estas restricciones se refieren al tiempo de ejecución de las rutinas de procesamiento de imágenes, bloques de exploración, etc.

En este trabajo se propone una arquitectura cooperativa multi-agente [8, 12, 11] que deriva del concepto convencional de arquitectura híbrida basado en un sistema estratificado dividido en grupos comportamentales: un comportamiento reactivo, en el que el sistema debe reaccionar de manera automática a un evento particular, es decir, si se detecta un objeto, el sistema de evitación de obstáculos modifica la trayectoria del vehículo para evitar un impacto y un comportamiento deliberativo, en el que se evalúan diferentes posibilidades y se seleccionan las más adecuadas en cada situación, por ejemplo, la generación de un camino entre dos puntos dependiendo del consumo, etc.

2 El Problema

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo de este trabajo es la inspección de cables submarinos mediante sistemas autónomos no tripulados. Para ello, el vehículo debe rastrear el cable y evaluar los datos capturados por la instrumentación para determinar los defectos del cable.

La metodología convencional para la inspección de cables submarinos consiste en un seguidor de cables, en el fondo del mar, basado en datos adquiridos de un sonar frontal. Para ello, las empresas utilizan vehículos submarinos no tripulados que detectan el cable con antelación y gen-

eran la trayectoria de referencia del vehículo. Sin embargo, en nuestra propuesta, generamos una trayectoria virtual basada en datos de sonar de barrido lateral que predice la trayectoria virtual por medio de datos previos. De esta manera, proponemos una arquitectura que se ocupa del seguimiento de cables submarinos utilizando datos de sonar de barrido lateral.

La estructura interna de los cables submarinos suele incorporar diferentes tipos de cables de acero que evitan cambios abruptos en la dirección del cable que descansa sobre el lecho marino. Es por eso que se espera que las trayectorias de estos cables sean suaves y que este aspecto se tenga en cuenta en el diseño del seguidor en las secciones siguientes.

2.1 El Vehículos Subacuático

En el presente trabajo, para resolver el problema indicado, se utiliza un vehículo con forma de torpedo, en el que se montan dos tipos diferentes de sonar: un sonar de barrido lateral (SBL) [3] y un sonar de navegación (SN). De esta manera, el vehículo puede adquirir datos relacionados con el lecho marino, en ambos lados del vehículo. La cobertura SBL nos permite detectar aproximadamente 1 metro del ancho del lecho marino. El SN está situado en la proa del vehículo y el SBL en la parte central del vehículo.

El estudio de la imagen se realiza mediante técnicas de visión por ordenador. Gracias a la imagen SN del entorno, es posible detectar objetos con anticipación, tanto dinámicos como estáticos, proporcionando un camino fiable y seguro. Es probable que en la imagen del SBL aparezcan diferentes objetos sobre el lecho marino, en ese estudio se debe tener en cuenta el estudio de las sombras acústicas, ya que proporciona características de los objetos.

Como se ha mencionado anteriormente, el SBL está situado en la parte central del vehículo proporcionando información de objetos dentro de la zona determinada por el ángulo sonar de detección. Esta zona de detección depende de la profundidad, por lo tanto hay límites más altos y más bajos para la detección fiable de cables submarinos.

Después de analizar y detectar el cable utilizando el SBL, los nuevos puntos de posición que corroboran la trayectoria correcta se determinan mediante un bloque de navegación que se describirá en la sección 3. Por lo tanto, el vehículo navega a partir del desarrollo teórico de una trayectoria obtenida ajustando, los puntos SBL adquiridos, por una función. Es importante destacar la ex-

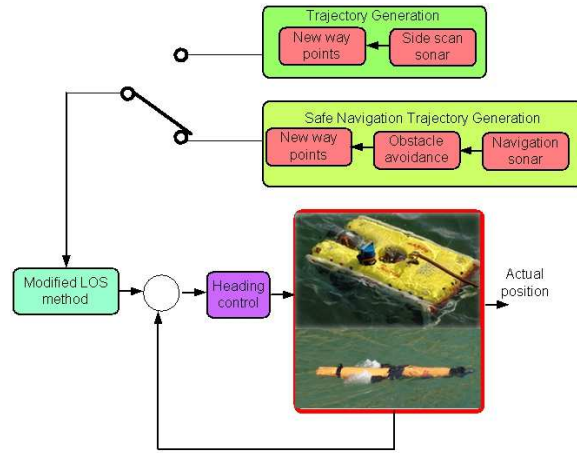


Figura 1: Arquitectura básica para el control de vehículos subacuáticos.

istencia de una relación entre la generación de la trayectoria y los cambios de velocidad repentinos en el equipo, ya que estos nuevos puntos de generación dependen de la velocidad del vehículo y por lo tanto de la posición obtenida en cada iteración.

2.2 Arquitectura Básica

La figura 1 muestra la arquitectura básica para el seguimiento de cables submarinos utilizando un vehículo con forma de torpedo con las características indicadas anteriormente. Esta arquitectura se basa en 4 módulos. Un módulo de generación de trayectorias para el seguimiento del cable submarino, que es capaz de generar una trayectoria teórica desde una función que combina todos los puntos previamente adquiridos para el siguiente conjunto de puntos de referencia, un sistema de navegación seguro, capaz de analizar y evitar cualquier objeto que pueda interceptar la trayectoria establecida por el módulo anterior, un sistema de decisión, basado en las reglas ECA (evento-condición-acción) [1], capaz de modificar el comportamiento del sistema cambiando el modo operativo de navegación a navegación segura en el instante que se detecta un peligro potencial y, finalmente, un sistema de seguimiento trayectoria, para seguir fielmente cada uno de los puntos de ruta proporcionados por el módulo de navegación encargado de reducir el error transversal.

3 Arquitectura de Control Propuesta

A partir de la arquitectura básica mencionada, se ha desarrollado una arquitectura compleja basada en un marco de sistemas multi-agente. La figura 2 muestra los diferentes módulos enmarcados den-

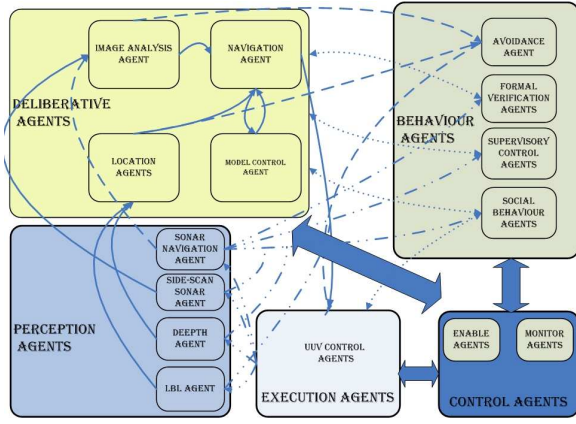


Figura 2: Arquitectura multi-agentes.

tro de cada capa y sus agentes correspondientes. Hay diferentes clases de agentes responsables de diferentes tareas, un grupo de ellos son responsables de la adquisición de datos ambientales y de posición del vehículo. Otros están a cargo de controlar el comportamiento dinámico del vehículo en diferentes situaciones. Por último, hay un grupo de ellos que proporciona cohesión a los diferentes módulos, los agentes de supervisión, cuya funcionalidad es unir a todos los grupos, mediante la planificación y control de los diferentes bloques.

Se ha incluido un bloque de control de agentes para el correcto funcionamiento del sistema, que habilita/deshabilita los módulos en función del rendimiento general del sistema. Es decir, el bloque de control del supervisor [10] modifica el rendimiento general con el fin de evitar comportamientos no deseados. Un claro ejemplo es la desactivación del bloque de navegación cuando el vehículo está dentro del bloque de evitación de obstáculos.

La figura 3 muestra los módulos y submódulos que componen el sistema, junto con los datos que se transmiten entre ellos. Como se ha indicado anteriormente, la arquitectura propuesta está dispuesta en capas, por lo tanto, estos módulos deben estar situados en su capa correcta.

La capa deliberativa tiene los módulos de navegación, los módulos de pérdida de cable. Por otra parte en la capa reactiva, podemos encontrar los módulos de evitación de obstáculos y los módulos de seguimiento de trayectoria.

El sonar del módulo de adquisición y procesamiento de imágenes es común a ambas capas, ya que los datos obtenidos por el SBL se usan en la capa deliberativa mientras que el SN es alimentado por sus propios datos.

3.1 Módulos

La arquitectura propuesta consta de cinco módulos principales. Las restricciones de tiempo de los módulos son diferentes, mientras que algunas de ellas funcionan en tiempo real como lo hace el módulo de ejecución, otros sistemas están latentes esperando su habilitación de un evento, el evento de este último tipo son los módulos de Evitación de Obstáculos y los Módulos de Pérdida de Cable. Esta sección resume cada uno de los módulos:

El módulo de navegación es responsable de la generación de una ruta fiable y segura para el vehículo. En el módulo de adquisición y procesamiento de imágenes se obtiene la posición del cable y se transfiere al sistema de coordenadas fijado a tierra. El sistema genera una trayectoria a partir de los puntos adquiridos en las etapas anteriores, para ello, los datos obtenidos se utilizan de tal manera que el sistema de decisión no sigue el camino definido cuando hay una gran variación en la velocidad. Cuando se ha definido la trayectoria del cable, que es una función de velocidad, se genera una trayectoria factible para el vehículo al alisar la trayectoria mediante b-splines. La zona de detección de objetos se calcula a partir de la definición de B-spline [9]. Esto se puede hacer resolviendo la siguiente ecuación:

$$P(t) = \sum_{i=1}^n P_i N_{i,j}(t) \quad (1)$$

siendo $P(t)$ la posición del vector a lo largo de una curva de dimensión m como una función de $t \in \mathbb{R}$, una curva de tipo spline de orden j , $P_i \in \mathbb{R}^m$ ($i = 0, \dots, n$) puntos de control y $N_{i,j}(t)$ son las funciones normalizadas B-spline de orden j y el vector $\Xi = \{x_0, \dots, x_{n+k}\}$. Estas funciones B-spline están definidas por las fórmulas de recursión de Cox-de Boor,

$$N_{i,j} \equiv \begin{cases} 1 & \text{if } x_i \leq t \leq x_{i+1} \\ 0 & \text{for the rest of the cases} \end{cases} \quad (2)$$

y para todo $j > 1$

$$N_{i,j}(t) = \frac{(t - x_i)N_{i,j-1}(t)}{x_{i+j-1} - x_i} + \frac{(-t + x_{i+j})N_{i+1,j-1}(t)}{x_{i+j} - x_{i+1}} \quad (3)$$

donde t es el tiempo, x es la posición del vehículo en el eje horizontal.

Aplicando las expresiones (1), (2) y (3), obtenemos una zona de operación segura como se puede ver en la figura 4.

De esta manera, a partir de la zona citada podemos establecer un volumen seguro para la operación del sistema (Figura 5). Sobreponiendo las

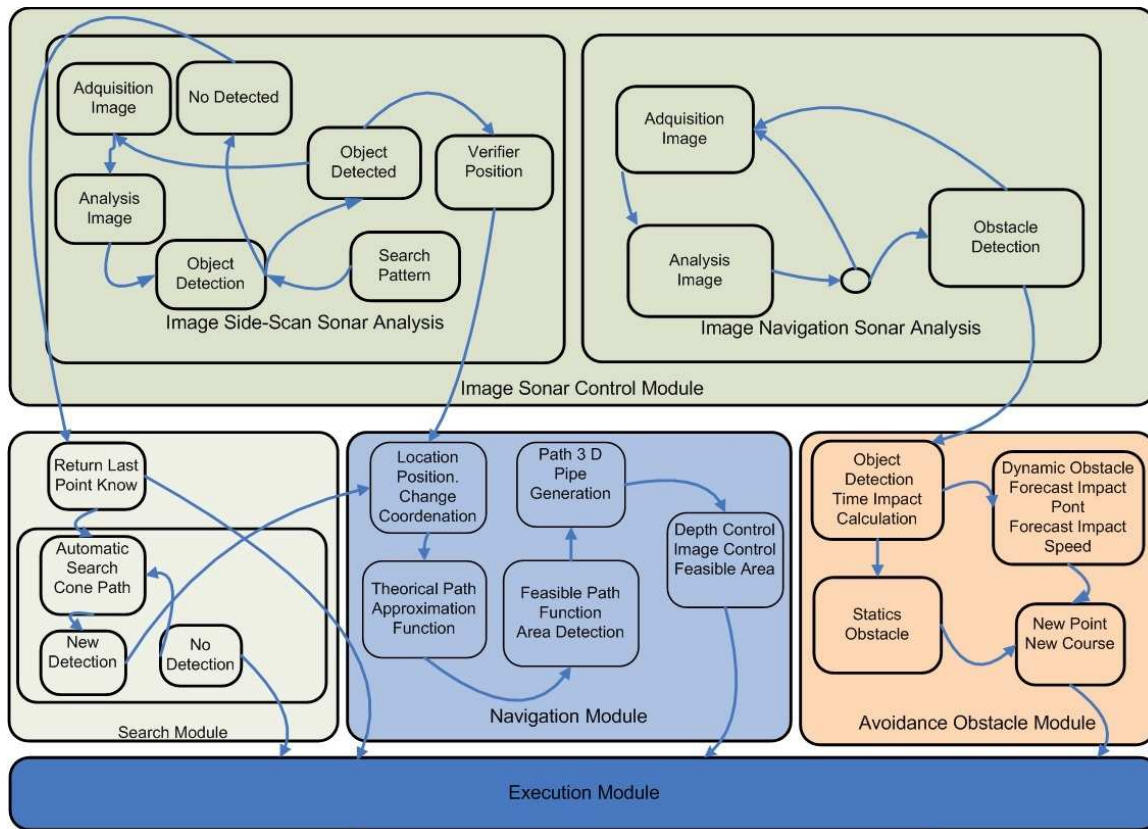


Figura 3: Arquitectura de control propuesta.

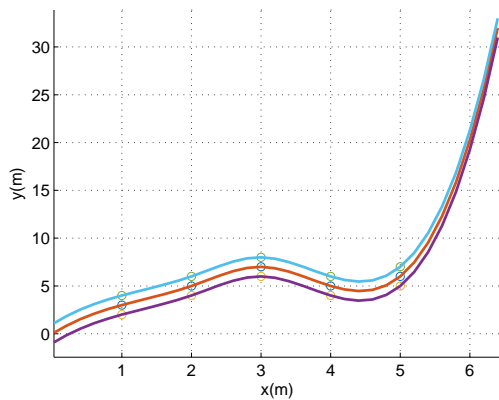


Figura 4: Área de detección (área entre las líneas azul y morada) y ruta teórica (línea roja)

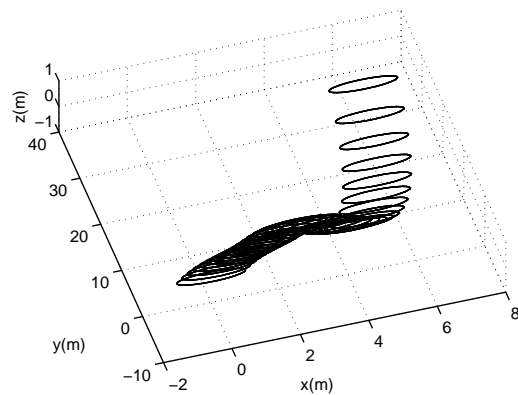


Figura 5: Ruta de seguridad volumétrica.

diferentes capas, limitadas sólo por la profundidad y la caracterización precisa de los objetos del fondo marino.

El módulo de control de imagen de sonar, alimenta los módulos de navegación y evitación de obstáculos. Al estudiar las imágenes SBL, se determina la posición del cable en el lecho marino. Además, al estudiar las imágenes del SN se determina la existencia de objetos en la trayectoria del sistema robótico.

Módulo de Evitación de Obstáculos, define un camino fiable para evitar un impacto sobre el vehículo, determinado por la trayectoria proporcionada por el módulo de navegación y cualquier objeto que esté en la zona frontal del vehículo.

Se supone que cada objeto detectado es estático y se evalúa con las siguientes imágenes adquiridas para determinar si esta suposición es aceptada o rechazada. El siguiente análisis de imágenes adquiridas se realiza en dos etapas, en el primer

paso, el módulo de evitación evalúa la posición relativa entre el vehículo y el objeto detectado y en el segundo paso se verifica si se ha modificado la forma proporcional del objeto comprobando un umbral predefinido. En el caso afirmativo, el supuesto inicial es rechazado y el objeto se considera dinámico.

Después de esto, se calcula la trayectoria del objeto dinámico y se determina el tiempo de impacto. Tanto para objetos dinámicos como estáticos, el módulo de prevención de obstáculos calcula la nueva ruta y la envía al módulo de ejecución.

Módulo de búsqueda. Cuando se accede a este módulo, se carga la última posición de cable conocida y luego se establece un camino seguro hasta este punto, después de que el vehículo lo alcance, el algoritmo de cable de búsqueda establece una trayectoria cónica para el vehículo, comenzando desde el último punto conocido hasta el área teórica determinada por el módulo de navegación. Una vez determinado el cable de nuevo, el sistema elimina el conjunto de puntos correspondiente a la ruta anterior y el ciclo comienza de nuevo. En caso de no encontrar el vehículo, éste sube a la superficie y transmite la última posición conocida a la estación de control.

Módulo de ejecución se compone de dos módulos. Un módulo de decisión, en el que la acción a realizar se determina en cada momento. Es un sistema basado en eventos que depende del comportamiento del sistema. Si el módulo de prevención de obstáculos detecta un objeto, se genera un camino para evitar el objeto. El control vuelve al módulo de navegación una vez que los vehículos han evitado el objeto. Otro módulo corresponde al algoritmo de seguimiento de ruta, donde se aplica el método LOS (Line of Sight) modificado, cuyo objetivo es reducir el error transversal entre cada uno de los puntos obtenidos por los Módulos de Navegación y Evitación de Obstáculos.

3.2 Características de la Arquitectura

En la arquitectura propuesta se utiliza una plataforma multi-agente cooperativa, que consiste en un grupo de agentes que integran los conceptos de modularidad y escalabilidad requeridos para tales aplicaciones.

La modularidad de la arquitectura permite un aumento en la capacidad de intercambiabilidad y conectividad entre módulos evitando incompatibilidades y riesgos de entendimiento entre ellos.

La escalabilidad del sistema permite reducir errores, producidos por el cambio de nivel o entorno. Un aspecto de suma importancia es la necesidad

de desarrollar diferentes estrategias de control operacional. Para ello se estima que se necesitará un módulo de verificación en el sistema. Por lo tanto, el módulo de generación de trayectorias se basa en datos previamente verificados y cuya interpretación no tiene inconsistencias potenciales que conduzcan respuestas indefinidas por el sistema de control. También se interpreta el trabajo de restricciones temporales de las capas, reduciendo los retrasos causados por los intérpretes de diferentes niveles en el lanzamiento de interrupciones o subrutinas para diferentes escenarios en el procesamiento de datos recibidos de sensores. El uso de esta arquitectura cooperativa multi-agente limita estos retrasos.

4 Resultados de Simulación

En base a lo expuesto en las secciones anteriores se ha implementado en el entorno Matlab/Simulink una máquina de estados finitos para la simulación del módulo de ejecución de navegación. Basado en un trabajo anterior [5], hemos implementado un modelo de maniobra para un sistema de guía basado en el método LOS modificado. Las corrientes oceánicas se han simulado mediante la inclusión de las fuerzas inducidas por la corriente y momentos en las ecuaciones dinámicas. Una forma de hacer esto es suponer que las ecuaciones están representadas en términos de la velocidad relativa. La forma en que se ha implementado la contribución de la corrientes al modelo de maniobra se encuentra en [4].

Los resultados para el sistema de guía se muestran en la figura 6 donde se comparan los resultados del LOS convencional con los de LOS modificado. Se observa una reducción en el error transversal de camino cuando se aplica el método LOS modificado para el vector de referencia de referencia dado por $([0,0;20,25;-20,30;-30,40;20,70;0,80])$.

La figura 7 muestra la generación de trayectorias para el vehículo con forma de torpedo. La línea verde discontinua representa la trayectoria dada por el módulo de navegación, ya que se ve que está casi totalmente dentro del área delimitada por el rango de haz de detección de cable del SBL a una profundidad constante.

En la figura 8 se muestra el volumen de navegación fiable para varias profundidades mostradas en cada una de las posiciones alcanzables por el vehículo submarino dentro del rango de detección.

5 Conclusiones

En este artículo hemos propuesto una arquitectura basada en agentes múltiples que permite respon-

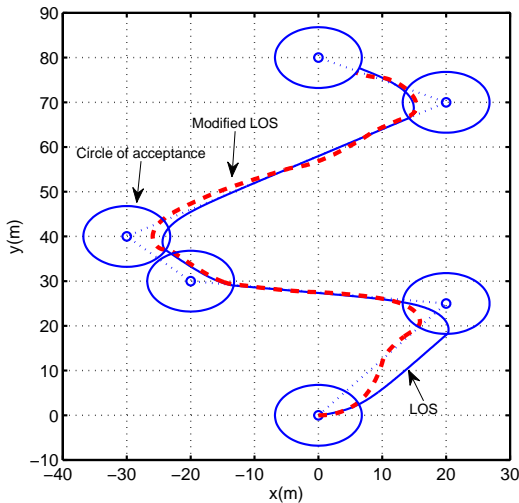


Figura 6: LOS convencional (línea azul) y LOS modificado (línea roja discontinua) con corrientes (0,3m/s) para el vector de referencia de waypoints=[0,0;20,25;-20,30;-30,40;20,70;0,80].

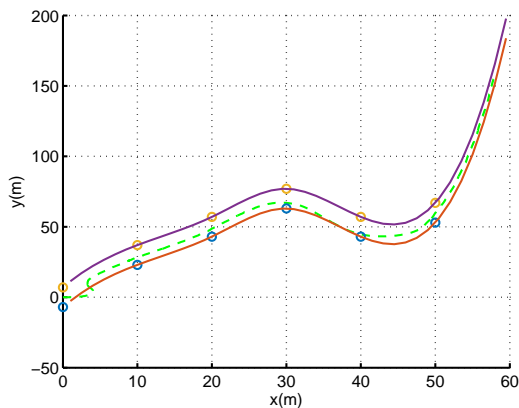


Figura 7: Área de detección (entre líneas azules y rojas) y camino simulado (línea verde discontinua) para el vehículo con forma de torpedo.

der a las restricciones de tiempo preestablecidas, que afectan tanto el tiempo como el seguimiento para la inspección de cables submarinos utilizando vehículos submarinos autónomos.

El uso de este tipo de vehículos en los últimos años se debe al avance en su autonomía, tanto desde el punto de vista de la energía como de la capacidad de decisión.

A través de la arquitectura propuesta, añadiendo la metodología basada en la generación de un espacio virtual tubular, perseguimos reducir la identificación del tiempo y mejorar el rendimiento de seguimiento del cable, además de dar una op-

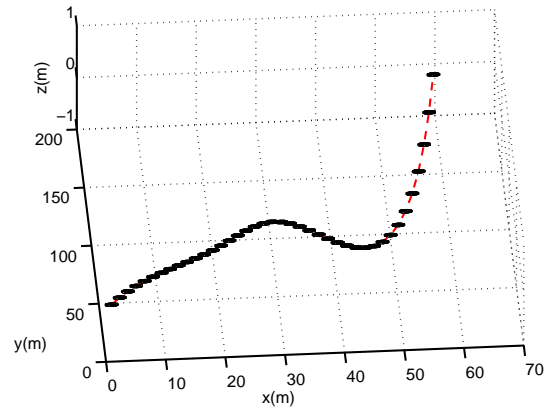


Figura 8: Volumen de detección y trayectoria desarrollada por el vehículo.

eración más fiable y segura.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el MINECO: DPI2011-27990 con fondos FEDER.

Referencias

- [1] Luntz Jonathan Almeida Emanuel and Tilbury Dawn. Modular finite state machines implemented as event-condition-action systems. In *Proceedings of the 16th IFAC World Congress*, 2005.
- [2] K. Asakawa, J. Kojima, Y. Kato, S. Matsumoto, N. Kato, T. Asai, and T. Iso. Design concept and experimental results of the autonomous underwater vehicle aqua explorer 2 for the inspection of underwater cables. *Advanced Robotics*, 16(1):27 – 42, 2002.
- [3] A. Bagnitsky, A. Inzartsev, A. Pavin, S. Melman, and M. Morozov. Side scan sonar using for underwater cables pipelines tracking by means of auv. pages 10 pp. –, Piscataway, NJ, USA, 2011//.
- [4] T.I. Fossen. *Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Marine Cybernetics, 2002.
- [5] Francisco J. Lastra Santos Jose Maria Riola Rodriguez Juan Jesus Diaz Hernandez Francisco J. Velasco, Elias Revestido Herrero and Luis M. Vega Antolin. Measurements of hydrodynamic parameters and control of an underwater torpedo-shaped vehicle. In *IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles*, 2015.

- [6] C.C. Insaurralde and D.M. Lane. Autonomy-assessment criteria for underwater vehicles. pages 8 pp. –, Piscataway, NJ, USA, 2012.
- [7] M. Jacobi and D. Karimanzira. Underwater pipeline and cable inspection using autonomous underwater vehicles. pages 6 pp. –, Piscataway, NJ, USA, 2013.
- [8] Liviu Panait and Sean Luke. Cooperative multi-agent learning: The state of the art. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 11(3):387–434, 2005.
- [9] L. Pedraza, D. Rodriguez-Losada, F. Matia, G. Dissanayake, and J.V. Miro. Extending the limits of feature-based slam with b-splines. *IEEE Transactions on Robotics*, 25(2):353 – 66, 2009/.
- [10] P.J. Ramadge and W.M. Wonham. Supervisory control of a class of discrete event processes. In A. Bensoussan and J.L. Lions, editors, *Analysis and Optimization of Systems*, volume 63 of *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, pages 475–498. Springer Berlin Heidelberg, 1984.
- [11] Stuart J. Russell and Peter Norvig. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Pearson Education, 2 edition, 2003.
- [12] Michael Woolridge and Michael J. Wooldridge. *Introduction to Multiagent Systems*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 2001.
- [13] O. Yildiz, A.E. Yilmaz, and B. Gokalp. State-of-the-art system solutions for unmanned underwater vehicles. *Radioengineering*, 18(4):590 – 600, 2009/12/.

EXPLORACIÓN Y RECONSTRUCCIÓN 3D DE FONDOS MARINOS MEDIANTE AUVs Y SENSORES ACÚSTICOS

Oscar L. Manrique, Mario Garzón y Antonio Barrientos

Centro de Automática y Robótica (UPM-CSIC), Universidad Politécnica de Madrid

c/ José Gutiérrez Abascal, nº2, 28006 Madrid

ol.manrique@alumnos.upm.es, ma.garzon@upm.es, antonio.barrientos@upm.es

Resumen

Este trabajo presenta un sistema para la reconstrucción 3D de fondos acuáticos poco profundos utilizando medidas de un array de sensores de distancia tipo sonar acoplado a un robot submarino tipo torpedo. Se utiliza el simulador UWSim, específicamente desarrollado para misiones subacuáticas así como la arquitectura de control y navegación COLA2 adaptada al modelo de robot utilizado. Se ha desarrollado también una aplicación que controla la trayectoria del robot, de modo que se garantice la cobertura completa del área teniendo en cuenta los solapamientos necesarios para crear el mapa. A medida que el robot se desplaza por el escenario, las medidas del multibeam se integran para crear nubes de puntos parciales, que luego se agrupan para obtener el mapa 3D del fondo completo. Esta tarea de agrupación requiere de un proceso de corrección errores de localización relativa, para lo que se utiliza el algoritmo Iterative Closest Point. Este algoritmo requiere un complejo ajuste de filtros y configuraciones que para afinar el resultado final y conseguir una reconstrucción de buena calidad. Finalmente, el sistema se probó sobre varios escenarios y trayectorias diferentes, diseñados con el fin de evaluar la robustez del sistema y la calidad del mapa generado.

Palabras clave: Reconstrucción 3D, PointCloud, Sensor Multibeam, Reconstrucción de fondos marinos, UWSim, COLA2.

1. INTRODUCCIÓN

El reconocimiento del fondo marino siempre ha supuesto un reto para la navegación subacuática, ya que las condiciones en este entorno son muy variables y normalmente desconocidas, además no es posible el uso de tecnologías de localización o de comunicaciones, en las cuales se basan hoy en día la mayoría de los sistemas de navegación terrestre. Por tanto, el estudio de los fondos marinos y su conocimiento a la hora de llevar a cabo las misiones, supone una gran ventaja cuando hablamos de navegación, y más aún si se trata de sistemas autónomos.

Este trabajo tiene como objetivo principal el desarrollo de un sistema completo para la generación de mapas 3D utilizando robots submarinos. Se pretende por tanto generar una misión que incluye generación de trayectorias, navegación autónoma, recolección de datos y procesamiento on-line y off-line de los datos para finalmente obtener una reconstrucción correcta del fondo. Las posibles aplicaciones de este trabajo son muy variadas, empezando por la navegación autónoma de AUVs, así como tareas de búsqueda y rescate además de otras aplicaciones de la robótica de alto nivel, pudiéndose integrar además en flotas heterogéneas de múltiples robots.

Para alcanzar el objetivo de este trabajo ha sido necesaria una combinación de desarrollos propios así como de integración y configuración de diferentes tecnologías o desarrollos previos, empezando por la simulación de entornos acuáticos, para la cual se utiliza en software *UWSim* [1]. Esta es una herramienta, de código abierto, específica para la simulación de misiones marinas. Es fácilmente configurable mediante un documento de *XML*, donde es posible incluir tantos objetos como se desee, así como parametrizar el entorno, añadiendo oleaje, presión, corrientes, claridad del agua entre otros, de manera que el escenario se asemeje a condiciones reales de operación. Este simulador ofrece también una gran variedad de sensores que se pueden adaptar fácilmente tanto al escenario como al vehículo que se introduzca en la escena.

El siguiente componente a integrar es el control y navegación del robot, para el que se utiliza la arquitectura *COLA2* [2], la cual se encuentra integrada en *UWSim* y ROS. Esta arquitectura, brinda las herramientas necesarias controlar los movimientos del robot y realizar una navegación hacia un punto de paso. Fue por tanto necesario desarrollar una aplicación, objetivo es ejercer como capitán del vehículo, es decir que se encargue de definir la trayectoria del vehículo y enviar a *COLA2* las sucesivas posiciones objetivo que se desea que el robot alcance para que recorra la trayectoria predefinida.

A medida que el robot se desplaza por el escenario, el sensor multibeam va publicando sus mediciones.

Es necesario por tanto, recoger estos datos y a partir de ellos crear nubes de puntos, que representan las medidas suministradas por el multibeam durante un periodo de tiempo. Una vez tenemos las nubes de puntos almacenadas, es posible generar un mapa 3D completo. Esta tarea podría realizarse de manera muy sencilla simplemente concatenando las diferentes nubes de puntos parciales. Pero debido a errores en las mediciones y en la localización del robot, cuyo error va incrementando continuamente, dos nubes de puntos pueden no coincidir perfectamente. Para solventar estos errores, se aplica el algoritmo *Iterative Closest Point (ICP)* [3], implementado en la librería *libpointmatcher* [4], este algoritmo se encarga de encontrar el movimiento relativo de una nube de puntos respecto otra, siempre que las dos compartan un área en común, es decir, teniendo dos nubes de puntos de áreas que se solapan entre sí, el algoritmo intentará rotar y/o trasladar una de las nubes de puntos de tal manera que ambas coincidan lo máximo posible. Esto solventa, en cierta medida, los errores de localización del robot que se han ido arrastrando desde el inicio de la misión.

Para finalizar, se han diseñado distintos escenarios, con objetos de diferentes tipos (conos, esferas, prismas). Así mismo, se han generado trayectorias diferentes para la cobertura del área, que requerirán tiempos de ejecución distintos y producirán nubes de puntos que se solapan más o menos. Estas trayectorias y escenarios se combinan y evalúan con el objetivo de realizar una valoración global del sistema desarrollado.

2. METODOLOGÍA Y DESARROLLO

Para la desarrollo del trabajo, ha sido necesario pasar por varias fases, cumpliendo objetivos parciales en cada una de ellas. Los más relevantes se detallan a continuación.

2.1. Integración del sensor con UWSim y ROS

UWSim está pensado de tal forma que su comunicación con el Sistema Operativo para Robots (ROS) sea especialmente sencilla. Incluso en su configuración por defecto se encuentran varios servicios y tópicos listos para ser utilizados, adicionalmente, en el archivo de configuración del escenario a simular, se incluye un bloque para definir la interfaz de comunicación con ROS, en la que se ofrecen 22 interfaces distintas. Así, por ejemplo, en este trabajo se utilizará un sensor *multibeam*, por lo que basta con añadir la interfaz *multibeamSensorToLaserScan* para disponer de un canal donde

se publiquen las medidas realizadas por el sensor correspondiente.

El sensor *multibeam* simula un conjunto de sensores de distancia cuya orientación se configura previamente, es decir se trata de una colección de sensores de alcance colocados en un mismo punto apuntando a distintos ángulos y contenidos en un mismo plano. Tanto el la resolución, o incremento angular, como los ángulos máximo y mínimo de apertura se pueden configurar fácilmente. Este sensor se ubicó en la parte ventral del robot, de manera que realice un barrido transversal a la dirección de navegación del robot. Esta localización se debe reflejar también en ROS mediante la publicación de una transformación entre la base del robot y la posición del sensor, en la Figura 1 se muestra una imagen de los datos generados por este sensor.

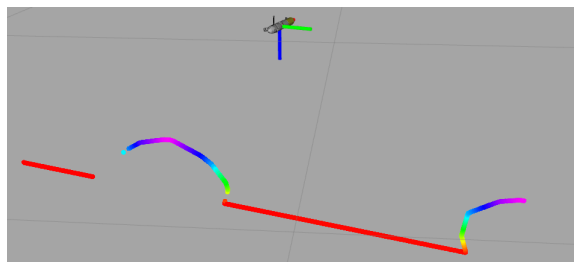


Figura 1: **Sensor multibeam.** Visualización de las lecturas recogidas por el sensor multibeam.

2.2. Guiado, Navegación y Control del AUV

La siguiente tarea a desarrollar es la navegación autónoma del robot, tarea necesaria para conseguir que el robot recorra un camino predefinido. Para esto se ha utilizado la librería *Component Oriented Layer-based Architecture for Autonomy (COLA2)*[2]. Esta arquitectura implementa un control basado en tres capas, reactiva, ejecución y misión y permite realizar misiones de manera autónoma. Además incluye los modelos cinemáticos y dinámicos de 2 robots extensamente utilizados en la investigación de robótica submarina (Sparus.II y Girona.500). Se ha utilizado una configuración propia de *COLA2* para que se adapte a los escenarios y a la misión.

Para el generación de la trayectoria de cobertura de área, se ha desarrollado un programa que envía al robot diferentes posiciones que debe alcanzar, de manera que al final el robot haya recorrido la trayectoria deseada y por tanto realizado un barrido completo de la superficie de interés, el algoritmo no enviará una nueva posición objetivo mientras que el vehículo no haya alcanzado la meta parcial. Para enviar la posición deseada del

robot, se utiliza un servicio que ofrece *COLA2*, con nombre `/enable_goto`. Este servicio define de manera automática los canales y señales de control que se deben utilizar, y requiere una serie de parámetros, en los que se define, entre otras cosas, la posición y velocidad deseada, el ángulo de rotación y la profundidad del punto final. La configuración que le pasemos afectará a la calidad de los resultados. Por poner un ejemplo, cuanto más rápido se ejecute el barrido, menos lecturas del fondo se realizará por metro recorrido.

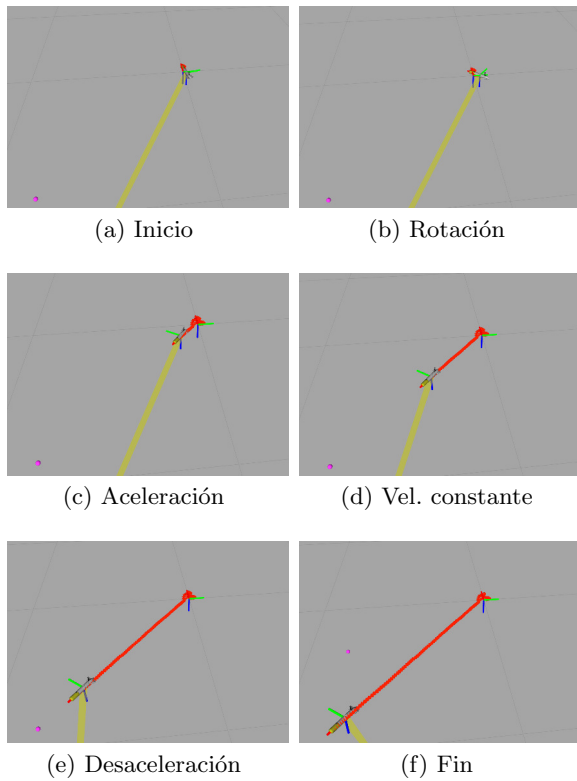


Figura 2: Secuencia de movimiento hacia una posición objetivo.

Como se aprecia en la Figura 2, el algoritmo que utiliza *COLA2* para alcanzar la posición objetivo inicia con una rotación pura hasta orientarse correctamente con la posición objetivo para después avanzar hacia ella. La secuencia avance inicia con una aceleración, continua con un movimiento a velocidad constante y termina con una desaceleración hasta alcanzar la posición objetivo. En la figura 2f el vehículo ya ha alcanzado la posición objetivo, es ese momento se le envía la siguiente posición objetivo, hasta completar la trayectoria deseada.

2.3. Creación de nubes de puntos parciales

Los datos generados por el sensor multibeam se publican en forma de mensajes de tipo *LaserScan*, que es utilizado para representar los datos de un escáner láser 2D. Gracias a ello, podemos trabajar de manera cómoda con los datos obtenidos. Para convertir estos datos en una nube de puntos y visualizarlas en 3D, es necesario agrupar una serie de estos mensajes y transformarlos a un mensaje tipo nube de puntos (*Pointcloud2*). Esta conversión se realiza utilizando el software *laser_assembler*¹ que recoge todas las medidas publicadas por el multibeam y las transforma en una nube de puntos que contiene todos los datos.

El proceso de creación de una nube de puntos se puede observar en la Figura 3, en la cual se inicia con una sola medida del multibeam y se van agrupando progresivamente hasta completar una imagen más significativa.

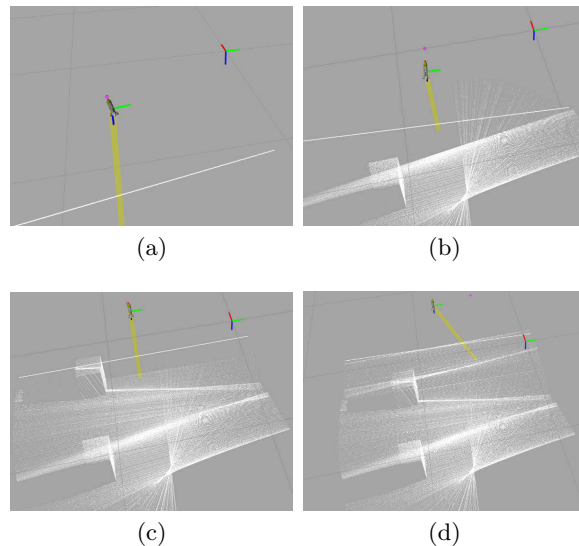


Figura 3: Secuencia temporal de lectura de medidas del multibeam.

El software de ensamblado de datos permite definir el intervalo de recolección de datos, definiendo dos instantes temporales correspondientes al inicio y final de la recolección. Para controlar este proceso se ha creado una aplicación que se encarga de enviar las solicitudes marcando los correspondientes en intervalos de tiempo. Esta aplicación debe crear las nubes de puntos garantizando que se solapen ciertas medidas entre una nube de puntos y la siguiente, ya que de no ser así no podría realizarse una correcta alineación en el siguiente paso del proceso, al intentar generar un mapa con nubes de puntos que no se solapan, el algoritmo

¹http://wiki.ros.org/laser_assembler

las agrupará de forma que varias secciones del mapa se superpongan en una sola, esto se visualiza claramente en la Figura 4.

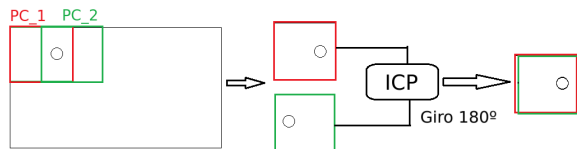


Figura 4: **Solapado erróneo.** El algoritmo ICP superpone las dos nubes de puntos para reducir al mínimo la distancia entre ambas.

3. Reconstrucción 3D del mapa

El siguiente paso del proceso, es la reconstrucción del mapa 3D juntando las diferentes nubes de puntos en una sola, de forma que se represente el escenario completo. Como se ha mencionado anteriormente, esta unión se realiza utilizando el programa *libpointmatcher* [4] y el algoritmo *ICP*. De modo que se alineen dos o más nubes de puntos que se superponen, de modo que se puedan corregir posibles errores y generar un mapa que se ajuste mejor a la realidad. Para poder hacer uso del *libpointmatcher*, es necesario convertir los Pointclouds a un formato válido para el programa, por se ha desarrollado una aplicación que transforma las nubes de puntos de mensajes *Pointcloud2* de ros a archivos en formato *Visualization ToolKit (.vtk)*.

El algoritmo *ICP* realiza una medición inicial de las distancias entre cada punto de una primera imagen o nube de puntos, con el punto más cercano en la segunda imagen. Una vez realizadas las medidas, se estima una matriz de transformación que aporte un movimiento de traslación y otro de rotación, aplica esta matriz a todos los puntos y vuelve a medir distancias con sus nuevos vecinos más cercanos. Este proceso se repite iterativamente hasta que se ha alcanzado una distancia mínima aceptable entre ambas imágenes.

Libpointmatcher aporta además otras funcionalidades, como la capacidad de aplicar varios filtros a las imágenes, antes y después del procesamiento. Esto permite eliminar posibles ruidos, o reducir la densidad de puntos cuando es excesivamente alta.

Otra funcionalidad que ofrece *libpointmatcher* y, como veremos más adelante, ha sido clave para el sistema, es la verificación de transformaciones (*TransformationChecker*). Cuando *ICP* estima una transformación, este componente se encarga de comprobar si los resultados del algoritmo cumplen límites preestablecidos. Es posible utilizar tres tipos de configuraciones, que conjuntamente

afectan tanto el tiempo de ejecución como la calidad del mapa obtenido, estas configuraciones se listan a continuación.

- **Número de iteraciones:** Acota superiormente el número de iteraciones que el algoritmo puede realizar.
- **Límite de error:** Establece un valor mínimo de diferencia entre las transformaciones estimadas por debajo del cual consideramos que el resultado del algoritmo es aceptable.
- **Acotación superior de rotación y traslación:** Limita los movimientos estimados de traslación y de rotación. Si el algoritmo estima unas transformaciones superiores, entonces el proceso finaliza.

Es posible encontrarse en una situación en que las nubes de puntos generadas no tengan un solapamiento suficiente, o cuando la superficie es muy homogénea. Para explicar esta situación, supongamos un entorno en el que solo existen unos pocos objetos y ejecutamos la misión para obtener los Pointclouds.

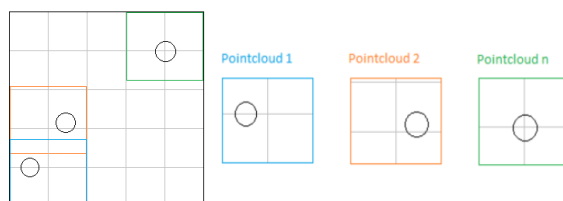


Figura 5: **Ejemplo de escenario y nubes de puntos.** Se presenta un esquema de un escenario sencillo con 3 objetos y se señalizan tres nubes de puntos tomadas durante la ejecución de la misión.

Como se puede ver en la Figura 5, el resultado serían tres nubes de puntos distintas a las que aplicaremos el *ICP*. Este algoritmo busca la transformación que consiga un menor error entre los puntos. En este caso, el resultado óptimo es juntar las nubes de puntos, dando lugar a una representación de la superficie irreal, como se muestra en la Figura 6.

Para solucionar esta situación ha sido necesario realizar dos adaptaciones al sistema completo, la primera de ellas consiste en buscar una mayor superposición de las nubes de puntos, para lo cual se modificó el método de obtención de las nubes de puntos, aislándolo completamente de la misión y generando una aplicación externa que genere las nubes de puntos con referencias de tiempo superpuestas, es decir, cada nueva captura inicia antes de terminar la anterior.

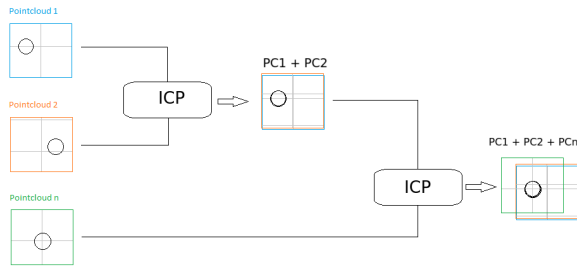


Figura 6: **ICP sin límites establecidos.** Se puede observar que el algoritmo ICP agrupa las nubes de puntos de manera errónea

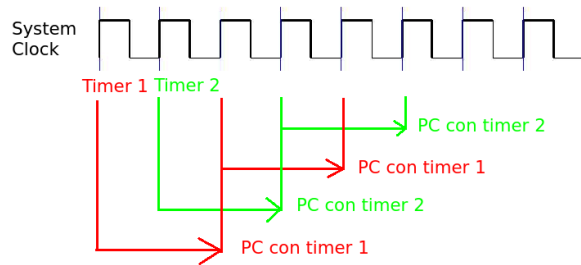


Figura 7: **Esquema de la toma de referencias temporales.**

Como se aprecia en la Figura 7, se utiliza un temporizador que genera las referencias de tiempo que se alternan entre sí, por tanto resulta en nubes de puntos que comparten aproximadamente el 50 % de su área total.

La segunda adaptación para solventar el problema del solapamiento fue el empleo de límites para el algoritmo *ICP*, como se ha explicado anteriormente, *libpointmatcher* permite establecer ciertos límites en el proceso de unión de imágenes. Se decide por ello imponer límites superiores en la matriz de transformación estimada por el *ICP*, tanto para la rotación como para la traslación. En los casos en que estos límites sean superados, se concatenarán las dos nubes de puntos sin corrección, es decir tomando solamente la posición del robot como referencia.

De esta manera, retomando el ejemplo presentado en la Figura 5, es posible conseguir que el *ICP* no ejecute la corrección de las nubes de puntos y que simplemente las concatene, una generando una única imagen que represente el escenario de manera más fehaciente, tal como se observa en la Figura 8.

4. Experimentos y resultados

Esta sección presenta una serie de experimentos que buscan realizar una valoración del sistema al completo y de los aspectos que pueden afectar a la calidad de los mapas obtenidos. Se eva-

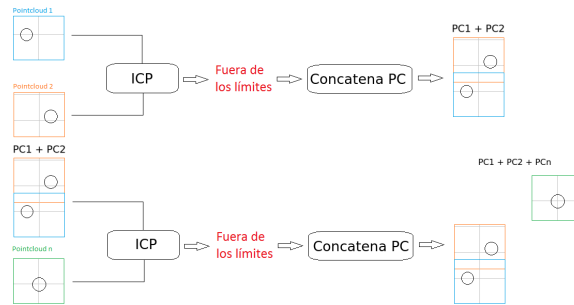


Figura 8: **ICP con límites de rotación y traslación.**

luará en efecto del tipo de trayectoria implementado así como de los diferentes objetos que se puedan encontrar en el fondo.

Es importante destacar la relevancia de la trayectoria elegida, pues como se ha explicado, la superposición de las nubes de puntos es un factor muy importante a la hora de crear el mapa global. Al generar las nubes de puntos a una frecuencia fija, el número de las mismas, el nivel de solapamiento y las áreas visitadas en repetidas ocasiones dependen de la trayectoria. Además, como es evidente, el tiempo que tardará la misión en realizarse depende directamente de la trayectoria realizada.

4.1. Tipos de trayectorias y escenarios

Para los experimentos se han generado tres tipos de trayectorias diferentes, descritas a continuación.

- **Rectangular** (Figura 9a): Trayectoria de 25 waypoints y 8 puntos de giro de 90 grados. El área de interés es recorrido de forma homogénea por lo que obtendremos un mapa con una densidad de puntos bastante similar.
- **Espiral** (Figura 9b): Trayectoria de 17 waypoints con 8 puntos de giro de 90 grados. Esta trayectoria inicia con un bajo grado de superposición que va aumentando a medida que se realiza el recorrido.
- **Triangular** (Figura 9c): Trayectoria de 19 waypoints con 8 puntos de giro de más de 90 grados. El objetivo de realizar esta trayectoria es la de estudiar casos en los que el robot tenga que realizar rotaciones más largas, de casi 180 grados. Se consigue además un alto grado de superposición entre todas las nubes de puntos.

De igual manera, se han creado escenarios con distintos tipos de superficies: conos, cilindros, prismas, esferas y uno con varios elementos diferentes.

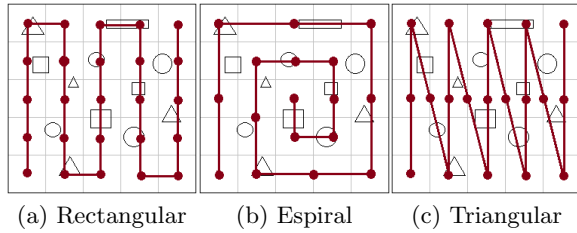


Figura 9: Tipos de trayectoria utilizados

El objetivo es evaluar si el tipo de objetos que se encuentran en el fondo influyen en la calidad del mapa generado, estos escenarios se muestran en la Figura 10.

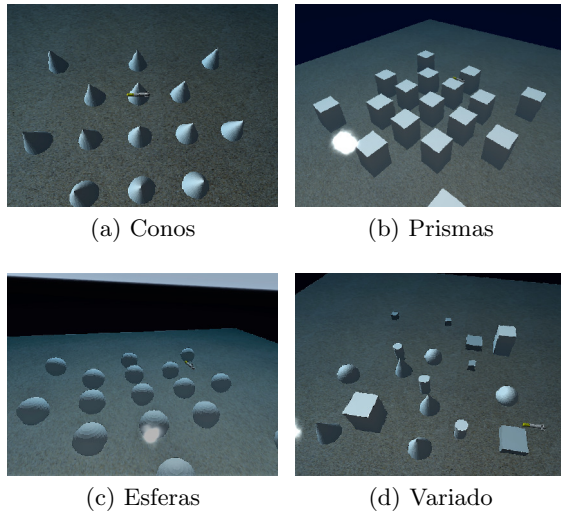


Figura 10: Escenarios utilizados

Una vez definido el escenario y el tipo de trayectoria se realiza el proceso de captura de datos. Este proceso inicia con el robot en la posición inicial de la ruta, a continuación el robot se mueve, siguiendo la trayectoria que se le ha definido, y a medida que avanza va capturando datos con el sensor multibeam. Estos datos se van agrupando en nubes de puntos parciales, que pueden visualizarse inicialmente una tras otra, es decir sin el proceso de corrección basado en *ICP*, los datos se almacenan en disco durante el experimento, y posteriormente se realiza la alineación utilizando *ICP*. La Figura 11 muestra una secuencia de captura de datos, así como las nubes de puntos parciales que se crean en línea.

4.2. Resultados

En esta sección presentamos algunos de los resultados obtenidos. Se debe tener en cuenta que para que esta valoración sea consistente, todas las misiones se han ejecutado con la misma configuración,

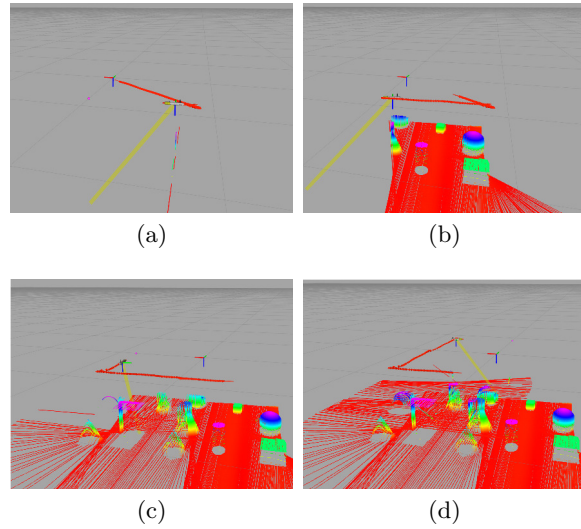


Figura 11: **Proceso de captura de datos** La línea roja en la parte superior muestra la ruta del robot. Los datos recogidos por el sensor multibeam se muestran en colores que varían según la altura relativa al fondo

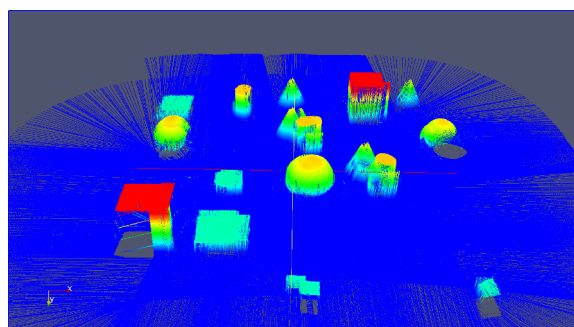
tanto del entorno acuático como de los parámetros del vehículo. La Figura 12 muestra el resultado del proceso en un escenario con elementos variados, en los cuales se puede apreciar la mejora en el detalle de los mismos, por ejemplo en los vértices de los conos o en la forma de los prismas.

La Figura 13 muestra el resultado antes y después de la alineación de las nubes de puntos para el escenario de esferas y la ruta rectangular, se puede observar que en este caso la mejora no es tan notoria, posiblemente debido tanto a la ruta del robot como a la configuración del algoritmo *ICP*.

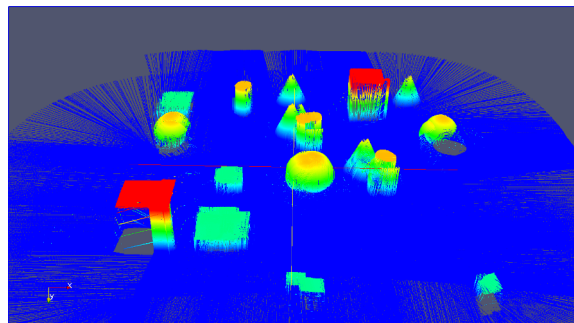
4.3. Análisis de resultados

Una vez obtenidos los resultados, es posible realizar algunas observaciones del comportamiento del sistema desarrollado:

- **Giros durante la misión:** Las nubes de puntos adquiridas mientras el robot realiza una rotación contienen bastantes errores, por tanto, para obtener un mapa de mayor calidad se podría realizar una selección previa con el fin de eliminarlas.
- **Filtrado de datos:** *libpointmatcher* ofrece una gran variedad de filtros para las nubes de puntos, que permiten obtener procesos de ejecución más o menos rápidos y unos resultados de mayor o menor calidad. Estos filtros deben ser calibrados detalladamente para conseguir mapas de la mejor calidad posible.



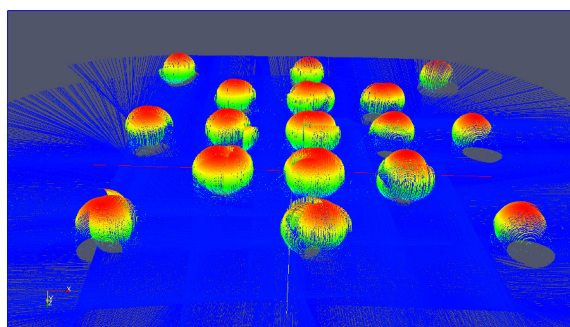
(a) Antes



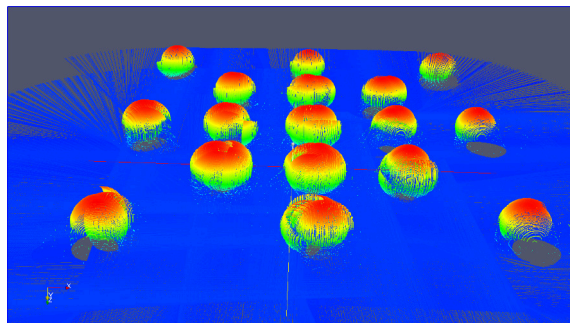
(b) Después

Figura 12: **Escenario variado** Se observan las nubes de puntos del escenario variado, antes y después del proceso de ajuste del mapa 3D utilizando ICP.

- **Influencia de los objetos:** No se ha observado que el tipo de superficie de los objetos influya directamente en la calidad de los mapas obtenidos. En todos los tipos de figuras se observan errores aparentemente similares. Sin embargo, si se ha detectado que en los objetos de menor tamaño se pueden apreciar más distorsiones o fallos en la reconstrucción. Otro aspecto a destacar, es que los errores destacan de manera más notoria en elementos que contengan vértices más cerrados, por ejemplo, en los conos.
- **Influencia de las trayectorias:** En este caso sí se aprecian claras diferencias entre unas trayectorias y otras, la mejor trayectoria para generar los mapas es la circular ya que se aprecia una mejor definición de los objetos así como una distribución de errores no homogéneos. Esto se debe a que se realizan más barridos por la zona central que por el exterior. En cuanto a los otros tipos de trayectorias, la rectangular y la triangular, no se han observado resultados concluyentes, sin embargo, los giros más amplios en la trayectoria triangular parecen afectar un poco más el resultado. El tipo de trayectoria realizada es el factor que más afecta la duración de la misión, ya que varía considerablemente la



(a) Antes



(b) Después

Figura 13: **Escenario esferas** Se observan las nubes de puntos del escenario con esferas, antes y después del proceso de ajuste del mapa 3D utilizando ICP.

longitud del recorrido. También tiene una influencia directa sobre el número de nubes de puntos obtenidas, pues la generación de estos se realiza a una frecuencia fija, por lo que en el caso de las trayectorias triangulares se obtienen muchas más nubes de puntos y tarda también un mayor tiempo en completar la misión.

- **Velocidad del movimiento:** Las misiones deben plantearse de tal manera que la velocidad sea la adecuada con respecto a la frecuencia del multibeam. De esta manera podremos conseguir una mejor definición del fondo con un solo barrido del vehículo.

5. Conclusiones

El trabajo presentado brinda una solución para la generación de mapas de fondos acuáticos, se han desarrollado e integrado diferentes herramientas que permiten generar los mapas abarcando el proceso completo, es decir, desde la planificación de una misión y los componentes necesarios para obtener los datos, hasta un tratamiento de los mismos y la generación del mapa final.

La integración de distintas herramientas para conseguir crear un mapa 3D paso a paso se ha basado

en el uso del framework ROS como punto de conexión entre los diferentes algoritmos y herramientas de software o librerías utilizadas (*UWSim*, *COLA2*, *libpointmatcher*).

La integración del algoritmo *ICP* como etapa final del proceso, ha permitido afinar el resultado, sin embargo, se ha comprobado que su uso correcto requiere de un ajuste muy fino de los parámetros y del pre-procesado de los datos.

El sistema desarrollado se ha probado en diferentes escenarios y utilizando rutas diversas. Se ha observado que la calidad del mapa resultante no varía considerablemente según los objetos presentes en el escenario. Sin embargo, se ha verificado que la trayectoria realizada sí afecta el resultado. Las pruebas han mostrado que una trayectoria circular permite una mejor reconstrucción, debido a que esta trayectoria realiza más barridos de la zona central y además permite visitar en varias ocasiones zonas cercanas, de modo que se facilita el trabajo del algoritmo *ICP*.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos RoboCity2030-III-CM (Robótica aplicada a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos. fase III; S2013/MIT-2748), financiado por los Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid y cofinanciado por los Fondos Estructurales de la Unión Europea y PRIC (Protección robotizada de infraestructuras críticas, DPI2014-56985-R), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España. Los autores quisieran además agradecer al grupo IRSLab en la Universidad Jaume-I de Castellón por su desarrollo del simulador *UWSim* así como al grupo ViCOROB de la Universidad de Girona por su desarrollo y colaboración con la arquitectura *COLA2*.

Referencias

- [1] M. Prats, J. Pérez, J. J. Fernández, and P. J. Sanz. An open source tool for simulation and supervision of underwater intervention missions. In *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2577–2582, Oct 2012.
- [2] Andres El-Fakdi y Marc Carreras Narcis Palomeras. Cola2: A control architecture for auvs. pages 695 – 716, Aug 2012.
- [3] P. J. Besl and N. D. McKay. A method for registration of 3-d shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2):239–256, Feb 1992.

- [4] François Pomerleau, Francis Colas, Roland Siegwart, and Stéphane Magnenat. Comparing ICP Variants on Real-World Data Sets. *Autonomous Robots*, 34(3):133–148, February 2013.

AUTOMATIZACIÓN DE MANIOBRAS PARA UN TEC DE 2GdL

Marina P. Portilla, José A. Somolinos, Amable López

E.T.S.I. Navales, U. Politécnica de Madrid. {marinap.portilla; joseandres.somolinos; amable.lopez}@upm.es

Rafael Morales, Eva Segura

E.I. Industriales de Albacete, U. de Castilla-La Mancha. {rafael.morales; eva.segura}@uclm.es

Resumen

En los últimos años ha habido una gran evolución en los dispositivos de aprovechamiento de la energía de las mareas y corrientes marinas. Los dispositivos cuya profundidad de operación no excede de los 40 metros, denominados TECs de primera generación, suelen fijarse al fondo marino mediante una estructura de obra civil, por lo que requieren que sus góndolas sean extraídas de sus bases para realizar las operaciones de mantenimiento. Actualmente se necesitan buques de muy altas prestaciones muy costosos para realizar las operaciones de extracción de las góndolas. La automatización de estas maniobras de emersión e inmersión de las góndolas conducirá, sin duda, a una importante reducción de costes, precisando buques de menores prestaciones para llevar a cabo estas tareas. En este trabajo se presenta un modelo dinámico simple, de dos grados de libertad, para un TEC de primera generación, además de un sistema de control de profundidad y/u orientación mediante actuadores pasivos, utilizando un sistema de agua de lastre interno a la góndola. Por último, se presentan diferentes simulaciones numéricas, tanto de la maniobra de emersión para proceder a las tareas de mantenimiento generales, como de la maniobra para la limpieza de palas, con el fin de poder juzgar la eficacia del modelo dinámico y del regulador diseñado.

Palabras clave: Convertidores de energía de las corrientes marinas, energía renovable marina, modelado dinámico, control no lineal.

1. INTRODUCCIÓN

La energía de las mareas y corrientes marinas es una fuente renovable que puede ayudar a alcanzar los objetivos de cambio climático marcados por la UE además de aportar un valor adicional en un mercado energético futuro con respecto a otras fuentes de energía renovable gracias a su alta previsibilidad ([3] y [6]). Es por esto que varios fabricantes están desarrollando dispositivos para su aprovechamiento en áreas donde la profundidad no excede los 40 metros ([2], [1], [13], [7]), como el mostrado en la figura 1.

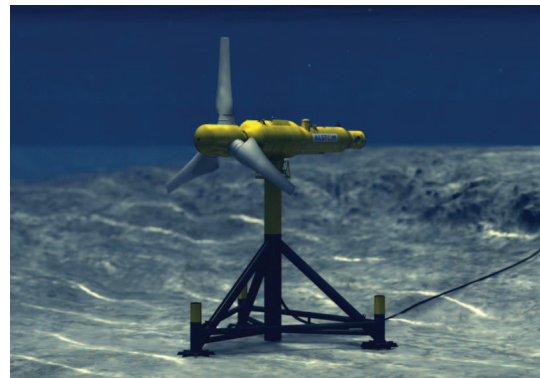


Figura 1: TEC de primera generación

Al tratarse de dispositivos completamente sumergidos, las tareas de mantenimiento de las unidades principales de potencia requieren de su extracción del lecho marino [10], [12]. Estas maniobras se realizan utilizando buques especiales, de muy altas prestaciones, equipados con posicionamiento dinámico, grúas, etc. además realizarse durante una ventana temporal apropiada, lo que da como resultado un alto costo en estas tareas. En la figura 2 se muestra un ejemplo de buque necesario para el manejo de la unidad de potencia principal de un TEC de primera generación.

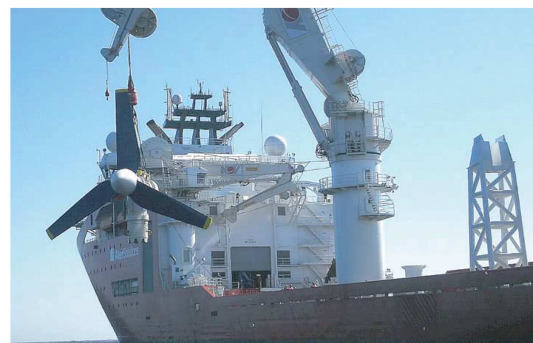


Figura 2: Buque sofisticado manejando una unidad de generación de energía

Para promover la viabilidad de este tipo de dispositivos resulta primordial la reducción de costos [11], ya sean de instalación, operación o de mantenimiento. La reducción de estos últimos pasa por la realización de maniobras de emersión y de inmersión de manera automática ([4], [8]). Esto puede llevarse a cabo mediante un sistema de las-

tres que, generando únicamente fuerzas verticales, permita controlar sus movimientos de emersión y de inmersión. Esta automatización permitirá reducir el número y duración de los procedimientos de instalación, reducirá el coste de la energía produciendo un aumento en la rentabilidad del proyecto, además de ser precisa una menor intervención humana, maximizando las ventanas temporales favorables y sustituyendo los buques altamente especializados por buques de propósito general, y por tanto menos costosos, como remolcadores, para llevar a cabo estas tareas. (Ver figura 3, de [9]).

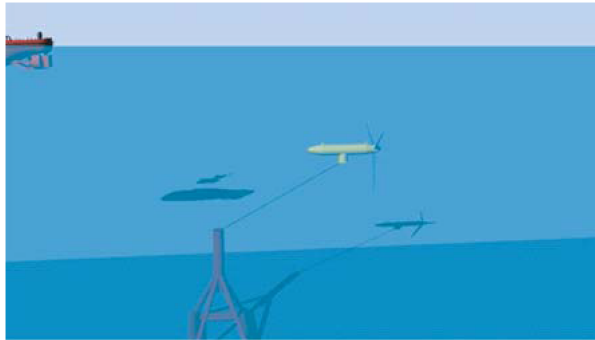


Figura 3: Ejemplo de maniobra de inmersión automatizada con control de agua de lastre

Este trabajo presenta un modelado dinámico muy simple para un TEC de primera generación, cuya forma ha sido adaptada para incluir los tanques de lastre necesarios. Se presenta también un sistema de control no lineal basado en un término de desacoplamiento y compensación de términos no lineales, para el control en bucle cerrado de la profundidad y/u orientación del dispositivo, asegurando un comportamiento adecuado cuando el TEC realiza maniobras de emersión e inmersión manejando actuadores que generan fuerzas únicamente hidrostáticas.

2. Modelo Dinámico

El TEC presentado en este trabajo ha sido diseñado para realizar maniobras de emersión/inmersión automáticas. Para ello se ha tenido que alargar la góndola e incluir los tanques de lastre ([5]) tal y como muestra la figura 4.

Para el diseño del modelo para control se utilizan dos sistemas de referencia, por un lado un sistema de referencia fijo, denominado S_0 y un sistema de referencia local, denominado S . Las coordenadas del dispositivo se definen con respecto a S_0 , cuyo eje x es perpendicular al plano del dispositivo, horizontal y sigue la dirección de la corriente, el eje z es vertical con orientación ascendente; y el eje y conforma un sistema dextrógiro. El origen de S_0 está situado sobre la vertical del dispositivo y en el nivel nominal del mar.

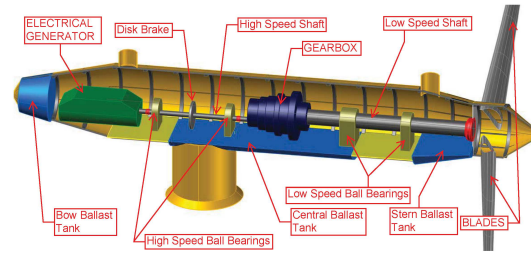


Figura 4: Aspecto de la góndola central modificada del TEC de primera generación

Para la obtención del modelo dinámico para control, de dos grados de libertad (la profundidad, $z(t)$, y la rotación alrededor del y , $\theta(t)$) se utilizan únicamente dos masas concentradas [9] tal y como se ve en la figura 5, donde se representa su posición así como las fuerzas hidrostáticas aplicadas y el criterio de signos. En esta figura se puede ver la existencia de un pequeño desplazamiento vertical ϵ_z de m_2 con el que se modela que el centro de gravedad del dispositivo está por debajo de su centro de carena para asegurar su estabilidad.

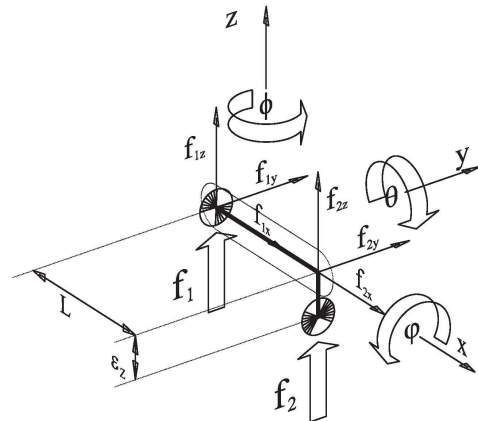


Figura 5: Modelo dinámico de dos masas concentradas

Se consideran por separado la dinámica de traslación según el eje z y la dinámica de rotación con respecto al eje y , un ángulo θ . Comenzando por la dinámica de traslación vertical se tiene:

$$(m_1 + m_2 + m_{Add}) \ddot{z} + \nu_z \cdot \text{sign}(\dot{z}) \cdot \dot{z}^2 = f_g + f_b \quad (1)$$

donde los subíndices $i = 1, 2$ representan la masa a la que hacen referencia, $m_{Add} = m_{Add}(z(t), \theta(t))$ expresa la masa añadida, el coeficiente ν_z denota el coeficiente de fricción y f_g y f_b son respectivamente las fuerzas de gravedad y de empuje, que se calculan como:

$$\begin{aligned} f_{ig} &= -m_i \cdot g \\ f_{ib} &= V_i(t) \cdot \rho_w \cdot g \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} V_i(t) &= \frac{1}{2} \cdot [V_0 + V_{Compr}] - V_{Buoy-i} + \Delta V_{u-i} \\ V_{Buoy-i}(t) &= V_{Buoy-i}(z(t), \theta(t)) \\ V_{Compr}(t) &= \gamma_0 \cdot z(t) \end{aligned}$$

donde $f_g = f_{1g} + f_{2g}$ y $f_b = f_{1b} + f_{2b}$, g es la constante de la gravedad, $V_i(t)$ expresa el volumen sumergido, V_0 representa el volumen nominal del dispositivo por lo que $m_1 + m_2 = \rho_W \cdot V_0$, $V_{Buoy.i}$ es la pérdida de empuje que se produce cuando el dispositivo no está completamente sumergido, γ_0 denota el coeficiente de compresibilidad, $\Delta V_{u.i}(t)$ es el volumen de control, $V_{Compr}(t)$ expresa la pérdida de volumen debido a la compresibilidad, ρ_w es la densidad del agua del mar, considerada constante.

En lo relativo al movimiento de rotación se tiene:

$$(I_{yy} + I_{yy_Add}) \ddot{\theta} + \nu_\theta \cdot \text{sign}(\dot{\theta}) \dot{\theta}^2 = (f_1 - f_2) \frac{LC_\theta}{2} + f_2 \epsilon_z S_\theta$$

$$I_{yy} = (m_1 + m_2) \frac{L^2}{4} + m_2 \epsilon_z^2 \quad (3)$$

donde $S_\theta \equiv \sin \theta$, $C_\theta \equiv \cos \theta$, I_{yy} es el momento de inercia en el eje y , I_{yy_Add} representa el efecto de la masa añadida, ν_θ es el coeficiente de fricción, L indica la eslora nominal del cilindros y ϵ_z denota el desplazamiento vertical de m_2 comentado anteriormente.

Finalmente se define la matriz de desacoplamiento que relaciona las fuerzas f_z y momentos Γ_y , con los volúmenes de control $V_{u.i}(t)$:

$$\begin{bmatrix} f_z \\ \Gamma_y \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{LC_\theta}{2} & -\frac{LC_\theta}{2} + \epsilon_z S_\theta \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}(\mathbf{q})} \cdot \underbrace{\rho_W \cdot g \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_{u.1} \\ \Delta V_{u.2} \end{bmatrix}}_{\mathbf{F}} \quad (4)$$

Se observa que la matriz \mathbf{M} es invertible para todo el rango deseado de $-\pi/2 \leq \theta \leq 0 \text{ rad}$ debido al desplazamiento ϵ_z , incluido en el modelo.

Finalmente, el modelo dinámico en forma matricial, se expresa como (donde $\mathbf{q}(t) = [z(t) \ \theta(t)]^T$):

$$\begin{bmatrix} f_z \\ \Gamma_y \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{LC_\theta}{2} & -\frac{LC_\theta}{2} + \epsilon_z S_\theta \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}(\mathbf{q})} \cdot \underbrace{\rho_W \cdot g \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_{u.1} \\ \Delta V_{u.2} \end{bmatrix}}_{\mathbf{F}} \quad (5)$$

3. Esquema de Control

La figura 6 muestra el esquema de control propuesto de dos grados de libertad para un TEC de primera generación. El regulador, con realimentación no lineal, $\mathbf{q}(t) = [z(t), \theta(t)]^T$, cumple:

$$\mathbf{F}(t) = \mathbf{M}^{-1}[\mathbf{q}(t)] \cdot [\mathbf{B} \cdot \mathbf{\Gamma}(t) + \mathbf{V}(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t))] \quad (6)$$

donde $\mathbf{\Gamma}(t)$ es:

$$\mathbf{\Gamma}(t) = \ddot{\mathbf{q}}^* - \mathbf{K}_D [\dot{\mathbf{e}}_q] - \mathbf{K}_P [\mathbf{e}_q(t)] - \mathbf{K}_I \int [\mathbf{e}_q] d\tau \quad (7)$$

siendo $\mathbf{e}_q(t) = \mathbf{q}(t) - \mathbf{q}^*(t)$ y \mathbf{K}_P , \mathbf{K}_I y $\mathbf{K}_D \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$ matrices diagonales definidas positivas.

Como se puede observar en la figura 6, el esquema de control está compuesto por un término de compensación y una matriz de desacoplamiento, basado en el modelo dinámico del TEC propuesto, que obtiene una relación entre entrada/salida lineal y desacoplada; y un bucle externo, basado en una acción de control lineal estabilizante. Los términos, $\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q}(t))\mathbf{y}\mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})(t)$, son computados en línea, ya que las matrices que componen el bucle de realimentación dependen de los valores actuales de las variables internas del sistema \mathbf{q} y $\dot{\mathbf{q}}$. Por otro lado, el objetivo principal del bucle exterior es estabilizar el sistema global. Hay que reseñar que se está operando con un sistema multivariable, y dependiente del tiempo de 2×2 .

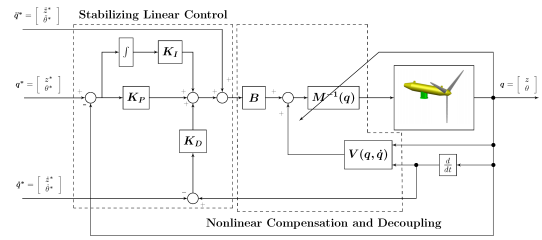


Figura 6: Diagrama de bloques del sistema de control no lineal propuesto

Sustituyendo las expresiones (6) y (7) en la ecuación obtenida del modelo dinámico diseñado, se tiene:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \ddot{\mathbf{q}}^* - \mathbf{K}_D [\dot{\mathbf{e}}_q] - \mathbf{K}_P [\mathbf{e}_q] - \mathbf{K}_I \int [\mathbf{e}_q(\tau)] d\tau \quad (8)$$

La señal del error en bucle cerrado, \mathbf{e}_q evoluciona según la siguiente ecuación diferencial de 2×2 , de tercer orden:

$$\mathbf{e}_q^{(3)}(t) + \mathbf{K}_D \ddot{\mathbf{e}}_q(t) + \mathbf{K}_P \dot{\mathbf{e}}_q(t) + \mathbf{K}_I \mathbf{e}_q(t) = 0 \quad (9)$$

Las matrices del regulador, $\{\mathbf{K}_P, \mathbf{K}_I, \mathbf{K}_D\}$ deben diseñarse de modo que se ajuste al siguiente polinomio de 2×2 , matricial, complejo y diagonal, $\mathbf{p}(s)$, definido como:

$$\mathbf{p}(s) = \mathbf{I}^{2 \times 2} s^3 + \mathbf{K}_D s^2 + \mathbf{K}_P s + \mathbf{K}_I = 0 \quad (10)$$

como polinomios Hurwitz de tercer grado. La estabilidad de la expresión (9) puede estudiarse utilizando el criterio de Routh-Hurwitz. Teniendo en cuenta que las matrices $\{\mathbf{K}_P, \mathbf{K}_I, \mathbf{K}_D\}$ son diagonales, la estabilidad de $\mathbf{e}_q(t) = [e_z(t); e_\theta(t)]^T = [z(t) - z^*(t); \theta(t) - \theta^*(t)]^T$, puede estudiarse de forma independiente. Aplicando el criterio de Routh-Hurwitz se obtienen las siguientes condiciones de

estabilidad: (i) $K_{D_i}, K_{P_i} > 0$; (ii) $0 < K_{I_i} < K_{D_i} K_{P_i}$ para $i = z, \theta$.

$$\mathbf{p}^{\text{des}}(s) = (\mathbf{I}^{2 \times 2} s^2 + 2\zeta_c \omega_c s + (\omega_c)^2) \cdot (\mathbf{I}^{2 \times 2} s + \mathbf{p}_c) \quad (11)$$

donde ζ_c , ω_c y $\mathbf{p}_c \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ son matrices diagonales definidas positivas. Los valores de las ganancias se obtienen identificando los términos de la expresión (10) con los de (11). El valor de las matrices de las ganancias del regulador, $\{\mathbf{K}_P, \mathbf{K}_I, \mathbf{K}_D\}$ del controlador no lineal propuesto, queda como:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_D &= 2\zeta_c \omega_c + \mathbf{p}_c \\ \mathbf{K}_P &= (\omega_c)^2 + 2\zeta_c \omega_c \mathbf{p}_c \\ \mathbf{K}_I &= (\omega_c)^2 \mathbf{p}_c \end{aligned} \quad (12)$$

4. Simulaciones

Se han realizado diferentes simulaciones numéricas para verificar el comportamiento del regulador en términos de controlabilidad del generador, capacidad de realizar maniobras de emersión e inmersión, convergencia rápida de los errores de seguimiento, respuestas transitorias suaves, bajo esfuerzo de control y robustez respecto a las incertidumbres paramétricas del modelo. Los valores de los parámetros físicos del TEC de primera generación utilizados son: $m_1 = m_2 = 38545 \text{ [kg]}$, $m_{Add} = 55119 \text{ [kg]}$, $L = 16,8 \text{ [m]}$, $\rho_W = 1025 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, $g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$, $I_{yy} = 5439470,4 \text{ [kgm}^2\text{]}$, $I_{yy_Add} = 3889197 \text{ [kgm}^2\text{]}$, $\nu_z = 24830 \text{ [kg/m]}$, $\nu_\theta = 18204 \text{ [kgm]}$ y $\epsilon_z = 0,1 \text{ [m]}$. Además hay que mencionar que, debido a la dificultad de modelar adecuadamente todos los términos dinámicos, se han incluido errores del 10 % en todos los términos que componen las matrices $\mathbf{M}(\mathbf{q}(t))$ y $\mathbf{V}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}(t))$. Los valores de $\{\mathbf{K}_P, \mathbf{K}_I, \mathbf{K}_D\}$ se calcularon según el procedimiento explicado en la sección anterior, considerando raíces reales puras y teniendo en cuenta la evolución deseada del vector de error de seguimiento $\mathbf{e}_q(t)$. Los valores de las matrices del vector polinómico de Hurwitz deseado, se han fijado como $\zeta_c = \text{diag}(1,2,1,2)$, $\omega_c = \text{diag}(0,15,0,15)$ y $\mathbf{p}_c = \text{diag}(2,2)$. El tiempo de muestreo utilizado en las simulaciones es de 0,2s.

4.1. Tarea general de mantenimiento

La saturación de los actuadores utilizados para producir fuerzas verticales limita la posibilidad de realizar maniobras de emersión/inmersión. En esta simulación, se mantiene la orientación del TEC y se diseña una trayectoria de tipo lineal con tramos polinómicos de orden 6 para la profundidad, asignando un perfil de velocidad cuasi trapezoidal, una velocidad de cruce y una desaceleración constante.

En la figura 7 se puede ver la evolución de los estados dinámicos del sistema no lineal obtenida para

cada uno de los movimientos independientes del TEC. El sistema funciona extremadamente bien con el tiempo de establecimiento deseado y sin sobreoscilaciones. Como se puede ver la góndola está en todo momento completamente sumergida mientras que una fracción de la hélice permanece fuera del mar. La figura 8 muestra la evolución de los volúmenes de control encargados de producir las fuerzas verticales adecuadas que permiten el control de la profundidad y la orientación del dispositivo. Finalmente, en la figura 9 se muestra la secuencia realizada, donde se puede comprobar como la orientación del dispositivo se mantiene todo el tiempo prácticamente constante, a pesar de la pérdida no lineal de flotabilidad causada por la hélice.

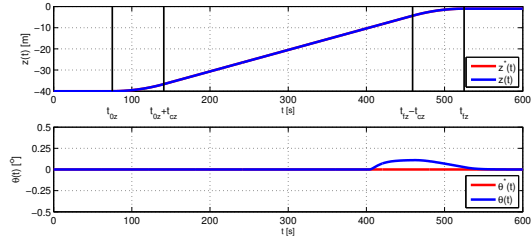


Figura 7: Maniobra de emersión. Evolución de la profundidad y la orientación del dispositivo

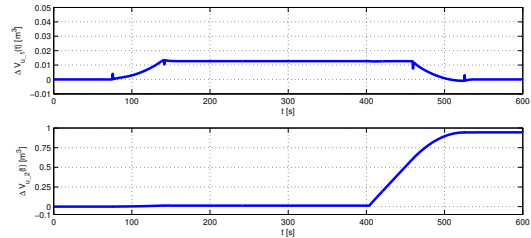


Figura 8: Maniobra de emersión. Evolución de los volúmenes de control

4.2. Tareas de mantenimiento de limpieza de palas

En este caso, se necesita variar de forma simultánea tanto la profundidad, como la orientación, partiendo de una posición del TEC horizontal para terminar en vertical con las palas hacia arriba facilitando así la tarea de mantenimiento. En la figura 10 se muestra la evolución tanto de la profundidad como de la orientación. Al igual que en el caso anterior, el sistema funciona extremadamente bien con el tiempo de establecimiento deseado y sin presentar sobreoscilación. La figura 11 muestra la evolución de los volúmenes de control encargados de producir las fuerzas verticales adecuadas que permiten el control de la profundidad y la orientación del dispositivo. En ella se

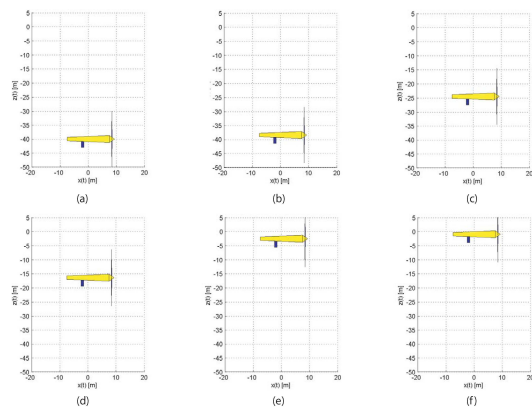


Figura 9: Secuencia visual de la maniobra de emersión: (a) $t = 0s$, (b) $t = 120s$, (c) $t = 260s$, (d) $t = 340s$, (e) $t = 480s$ y (f) $t = 600s$

observa un aumento considerable de los volúmenes de control cuando la orientación del sistema es cercana a 90° , debido a que el sistema está cerca de una configuración singular, aunque $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ sigue siendo no singular. Por último, la figura 12 muestra la secuencia de emersión para la realización de la tarea de mantenimiento de limpieza de palas.

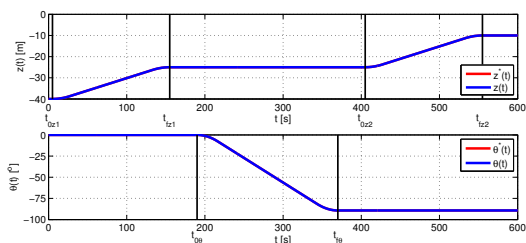


Figura 10: Maniobra de emersión para limpieza de palas. Evolución de la profundidad y la orientación del dispositivo

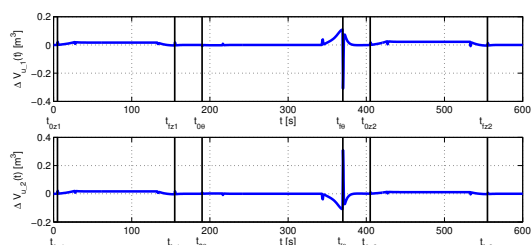


Figura 11: Maniobra de emersión para limpieza de palas. Evolución de los volúmenes de control

5. Conclusiones

La explotación de energías renovables de mareas y corrientes oceánicas cuando la columna de agua es inferior a 40 metros permite la instalación de

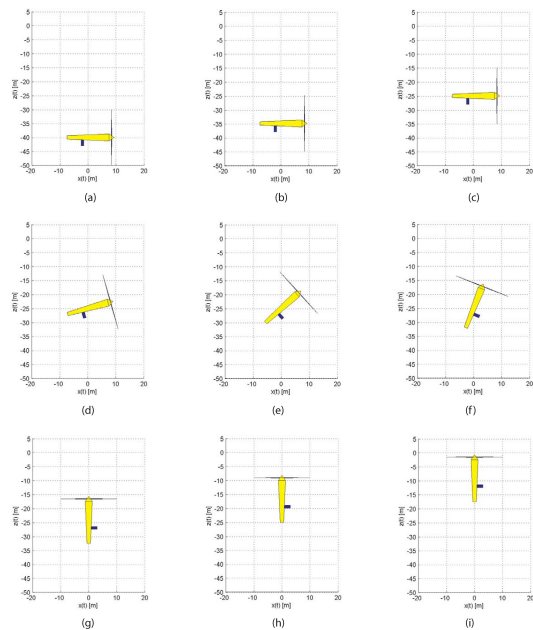


Figura 12: Secuencia visual de la maniobra de emersión para limpieza de palas: (a) $t = 0s$, (b) $t = 60s$, (c) $t = 160s$, (d) $t = 230s$, (e) $t = 275s$, (f) $t = 320s$, (g) $t = 400s$, (h) $t = 480s$ e (i) $t = 600s$

los denominados dispositivos de primera generación. Se buscan nuevas soluciones para la automatización de las maniobras de emersión/inmersión del TEC para mejorar su competitividad económica, ya que se disminuirían enormemente los costos de mantenimiento. El rendimiento de estas maniobras automatizadas se basa en el correcto control en bucle cerrado del agua de lastre utilizada como actuador hidrostático para producir fuerzas verticales. Se han rediseñado algunos aspectos de la góndola con el fin de incluir los tanques de lastre.

Este artículo propone un modelo dinámico muy simple, que puede ser utilizado para controlar un TEC de primera generación, concebido para aprovechar la energía de las corrientes marinas. El modelo dinámico, de dos grados de libertad se obtiene de únicamente dos masas concentradas, colocadas en un plano. El control de estos dos grados de libertad se realiza únicamente por control de agua de lastre. También se ha presentado una ley de control no lineal, para asegurar un comportamiento adecuado cuando el TEC realiza maniobras de emersión e inmersión. El esquema de control está compuesto por un término de compensación de la fricción y una matriz de desacoplamiento basados en el modelo dinámico del TEC de primera generación y un bucle de realimentación, basado en una acción de control lineal estabilizante que opera con el vector de error de seguimiento. El método de control propuesto es simple, computacio-

nalmente eficiente y fácilmente implementable en un sistema basado en microprocesador. Finalmente, se han llevado a cabo diferentes simulaciones numéricas verificando el buen comportamiento del regulador diseñado en términos de controlabilidad del generador, capacidad de realizar maniobras de emersión e inmersión con actuadores hidrostáticos (o pasivos), convergencia rápida de los errores de seguimiento en el entorno del cero, respuestas transitorias suaves, el bajo esfuerzo de control y la robustez en el caso de las incertidumbres paramétricas del modelo. Se han diseñado diferentes secuencias de emersión para mostrar la capacidad del TEC para realizar diferentes maniobras, manteniendo la orientación o tareas de mantenimiento para la limpieza de palas con cambio simultáneo de profundidad y orientación. Los resultados obtenidos muestran que el sistema funciona extremadamente bien con el tiempo de establecimiento deseado y sin sobreoscilaciones incluso cuando el dispositivo no está completamente sumergido y tiene una fuerte interacción con la superficie libre.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, bajo los Proyectos Nacionales DPI2014-53499R y TEC2016-80986R. Los autores agradecen a Lorenzo Fernández la realización de las simulaciones gráficas.

Referencias

- [1] Alstom Tidal Turbines Web Page. Disponible online: <http://alstomenergy.gepower.com/products-services/product-catalogue/power-generation/renewable-energy/ocean-energy/tidal-energy/tidal-power/index.html>.
- [2] Andritz Hydro Hammerfest. How it Works. Disponible online: <http://www.andritz.com/hy-hammerfest.pdf>.
- [3] Brito, A; Villate, J.L., (2014) Implementing Agreement on Ocean Energy Systems. Annual Report; The Executive Committee of Ocean Energy Systems: Lisbon, Portugal.
- [4] Carbon Trust, (2011) "Accelerating Marine Energy: The Potential for Cost Reduction Insights from the Carbon Trust Marine Energy Accelerator". Disponible online: <https://www.carbontrust.com/media/5675/ctc797.pdf>.
- [5] Espín, G. Montserrat, M., (2015) "Modelado Dinámico y Control de Maniobras de Dispositivos Submarinos." Ph.D. Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- [6] Hardisty, J., (2009) The Analysis of Tidal Stream Power; Wiley: Hoboken, NJ, USA.
- [7] López, A.; Núñez, L.R.; Somolinos, J.A., (2011) "Modelado energético de convertidores primarios para el aprovechamiento de las energías renovables marinas", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol 11, pp 224-235.
- [8] López, A., Núñez, L.R., Somolinos, J.A., Valle, J., (2011) "Dynamic behavior of a second generation hydrokinetic converter." *Proceedings IEEE International Conference on Oceanic Engineering (OCEANS 11)*, Santander, España, 6-9 de junio de 2011.
- [9] Morales, R.; Fernández, L.; Segura, E.; Somolinos, J.A., (2016) "Maintenance Manuever Automation for an Adapted Cylindrical Shape TEC." *Energies*, 9, 746.
- [10] Nautricity Web Page, (2016). Disponible online: <http://www.nautricity.com/cormat/>.
- [11] Núñez, L.R.; López, A.; Somolinos, J.A.; Robledo, F., (2012), "Conceptual design of an ocean current turbine for deeper waters". *Maritime Engineering and Technology*, CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2012, pp 607-612.
- [12] Tocardo Web Page, (2016). Disponible online: <http://www.tocardo.com>.
- [13] Verdant Power. Kinetic Hydropower System (KHPS), (2006). Disponible online: <http://www.verdantpower.com/kinetic-hydropower-system.html>.

MERBOTS PROJECT: OVERALL DESCRIPTION, MULTISENSORY AUTONOMOUS PERCEPTION AND GRASPING FOR UNDERWATER ROBOTICS INTERVENTIONS

Pedro J. Sanz, Raul Marin, Antonio Penyalver, David Fornas, Diego Centelles
Jaume I University of Castellon
e-mail(sanzp,rmarin,penaalvea,dforas,centellid AT uji.es)

Resumen

The MERBOTS project is, at the moment of writing the present article, in its third year, and have already obtained most of the expected results, from both lab and sea field trials. The project is being coordinated by the Jaume I University (i.e. IRS Lab), jointly with the University of Girona (i.e. CIRS Lab), and University of Balearic Island (i.e. SRV Group).

Recent results demonstrate the viability to perform semi-autonomous cooperative interventions in underwater scenarios for archaeological applications. In this paper, first of all an overall description of the project is given, and then some results belonging to the UJI subproject are explained in more detail, such as communications and, in a more detailed manner, the autonomous perception and grasping modules

Key Words: Marine Robotics, Autonomous Grasping, Underwater Communications

1 Introduction

The MERBOTS (DPI2014-57746-C3-1-R) coordinated project has been organized into 3 subprojects:

- MERMANIP (DPI2014-57746-C3-1-R), under responsibility of UJI, in charge of the multi-sensory based autonomous manipulation, the multi-modal user interface, and the Sonar/RF communication system for enabling compressed image transmissions between the robots and the human operator.
- ARCHROV (DPI2014-57746-C3-3-R), under responsibility of UdG, assuming the cooperative mobile robotics part, including communications and localization of the mobile robots, sonar-based survey, and path planning, also the construction of a new ASC and the final mechatronics, hardware/software integration will be under their responsibility.

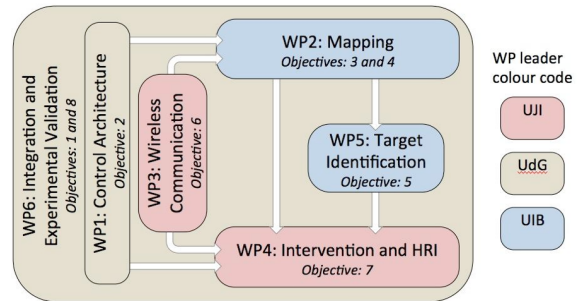


Figure 1: Relationships between Work-packages

- SUPERION (DPI2014-57746-C3-2-R), under responsibility of UIB, in charge of processing the multi-modal sensor data collected during the survey stage to build 3D models of the area of intervention and the target, as well as for searching the target prior to the intervention and tracking the target during the intervention.

In Figure 1 can be appreciated the relationship between the work-packages. In fact, the UJI subproject is focused mainly in the hand-eye coordination for intervention, the Human-Robot Interaction (HRI), and the Wireless Communication, enabling the long term objective of a Wireless H-ROV for underwater archaeological missions.

2 Overall System Description

The robot intervention is performed by using two ordered missions: The first one, cooperative survey (see Figure 2), comprises an autonomous survey of the seabed by means of an AUV assisted by a surface vehicle that provides absolute localization and communication.

Moreover, the second mission (see Figure 3), cooperative intervention, includes a semi-autonomous intervention by means of an HROV assisted by an AUV providing an external view of the intervention. In order to achieve the second mission, the data acquired during the cooperative survey mission has been processed to reconstruct and visualize the scene in the HRI. Wireless image

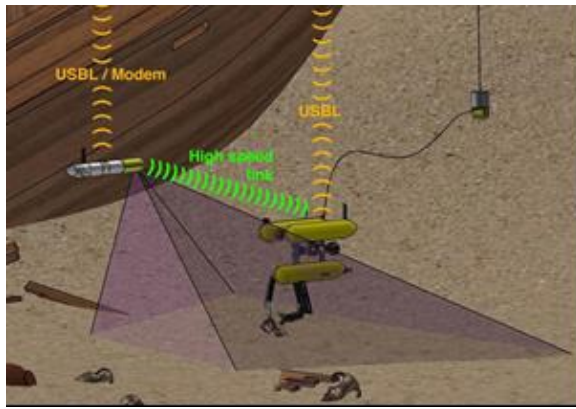


Figure 2: Mission 1: Survey using a surface and an underwater robot

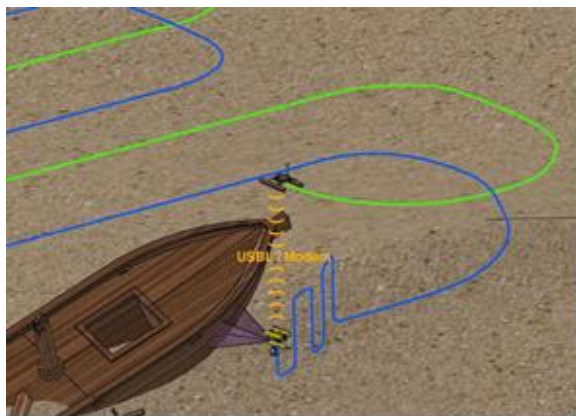


Figure 3: Mission 2: Intervention using a mobile manipulator and a assistant robot for external point of view

transmission and HROV control have been also demonstrated.

3 Background

Only a very short introduction will be addressed in the next to clarify the main reason to move from autonomous intervention systems (I-AUV) to hybrid ones (H-ROV). Bearing in mind that the underlying context is related with the "search and recovery problem" the reviewed works will be focused mainly on this issue. The first object manipulation from a floating vehicle (I-AUV) was achieved in 2009 within the SAUVIM project [4], demonstrating the capability of searching for an object whose position was roughly known a priori. The object was endowed with artificial landmarks and the robot autonomously located it and hooked it with a recovery device while hovering. More recently, the first multipurpose object search and recovery strategy was demonstrated in the TRIDENT project in 2012. First, the object was

located using a down-looking camera and photo-mosaicking techniques. Next, it was demonstrated how to autonomously "hook" the object in a water tank [5]. The experiment was repeated in a harbor environment using a 4 DOF arm [6], and later with a 7DOF arm endowed with a 3 fingered hand [8]. Nevertheless, according to [3] "Long-term AUV vision" the technology for light intervention systems is still immature, but very promising. In summary, MERBOTS aims to bring a team of heterogeneous marine robots (an ASC, an AUV and an HROV) together, tightly cooperating to conduct a multimodal survey (stereo, laser and multibeam) of an unknown, unstructured area with significant 3D relieve (like a shipwreck), where a multifunctional intervention operation must be performed. A mixture of autonomous (ASC and AUV) and task-level teleoperated vehicles (HROV) has been developed. So, MERBOTS has been able to integrate recent and promising technologies to explore the powerful concept of a wireless HROV, in the cutting-edge of technology.

4 Intervention: 3D Grasping Determination and Execution

4.1 Multipurpose/Multisensory-Based Manipulation

This task concerns the semi-autonomous planning of 3D contact points for a given intervention task. First, we will identify the grasp requirements for the tasks of this proposal in terms of the required forces and torques, and constraints in the geometry of contact points. With this info, a 3D grasp planner is developed. It takes as input the multi-view target tracking for manipulation (this task has been responsibility of UIB), and computes valid grasps according to the requirements identified in the first step. The 3D grasp planner is integrated in the user interface, thus assisting the user in the specification of the intervention by suggesting possible grasping configurations. The planner has been validated with different grasping tasks.

In the experiment presented in this article, the multi-view laser reconstruction is made using the real system. The robot has an electric manipulator with 4 DoF (Light-weight ARM5E), a lineal green laser for underwater operations (MKIII), and a submarine camera (Luxus Compact Camera). Then, the robotic arm is used for obtaining different points of view of the scene, calculating the 3D Point Cloud (see Figure 4).

Once the 3D Point Cloud is obtained, the RANSAC algorithm is used for segmentation. First of all, a plane-based geometrical model is used to detect the points that belong to the background.

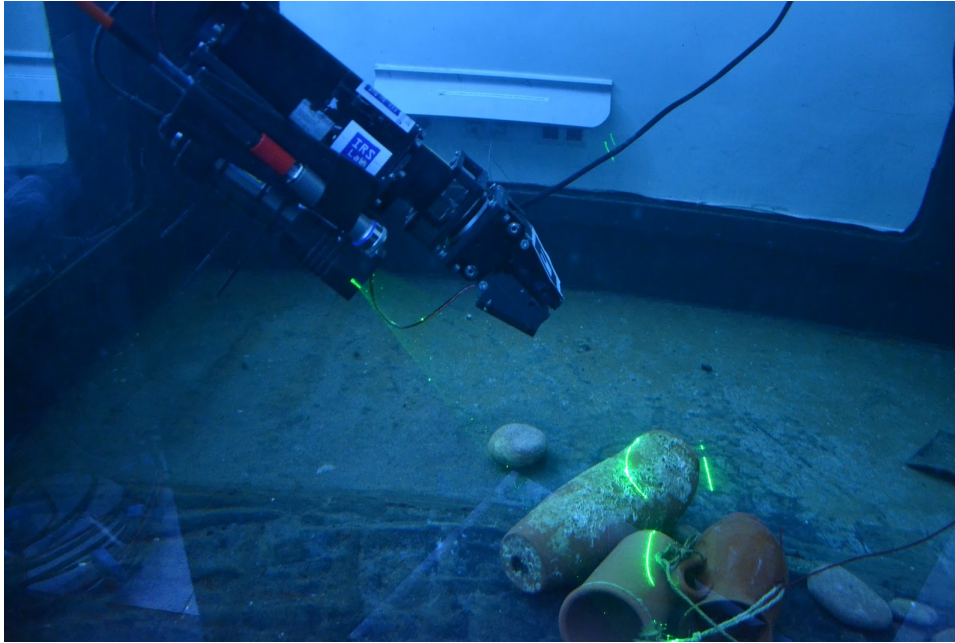


Figure 4: Multiple robot positioning for multi-view scene 3D reconstruction

With this information the depth related to the arm is easily obtained. After that, the interest object is segmented, by using pre-defined models, such as for example cylinders to detect an amphora. This procedure helps to extract the position, center, inertial axis, radio, and height.

4.2 Grasping Determination

The grasping determination procedure starts once the geometrical aspects of the object have been calculated, in order to obtain an appropriate vector to reach the object and grasp it.

For this, some parameters are taken into account: (1) "T", translation through the minimum inertia axis, (2) "R", rotation respect to the X axis of the object, which permits the grasping execution that facilitates the stability of the robot, and (3) "D", which determines the execution of the grasping at a given distance from the object, depending on its radio and the geometrical representation of the gripper.

To validate the grasping determination algorithm a user interface has been designed (see Figure 5), which allows not only evaluate the proposed grasping, but also modify some of its parameters, such as position, rotation, etc. The new grasping specification can be made by two methods: (1) modifying the geometrical parameters (i.e. T, R and D), and (2) by using Interactive Markers.

5 Grasping Execution

As can be seen in Figure 6, once the grasping has been calculated, its corresponding robot position to let the end-effector reach the grasping point is calculated. The joints are moved accordingly to the final position and the gripper is actuated to perform the grasp.

To help in the grasping execution and avoid uncertainties, the force sensor is used, which is installed in the robot wrist.

While the robot-arm is moving the values from the force sensor are analysed, adjusting the movement accordingly, depending on the different kind of possible contacts:

- If the contact has been produced when the end-effector is at a greater distance than 5cm from the final position, it is considered that the hand touched the object. In this case, the hand is elevated and adjusted the grasping execution position, considering which is the finger that actually touched the object, and moving the hand left or right accordingly.
- Otherwise, if the contact has been produced when the distance to the final position is less than 5 cm, it is considered that the robot hand touched the sea floor, adjusting the final grasping height accordingly to make the grasping more stable.

Once the end-effector reached the final grasping position, the gripper is closed. To detect the force

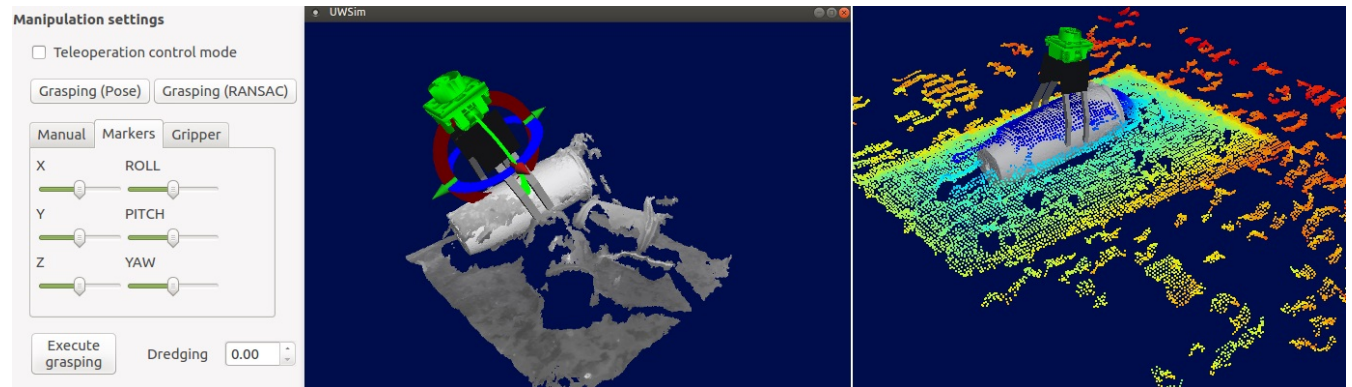


Figure 5: User Interface for human supervision using a real point of cloud (left). Results obtained from simulation (right)

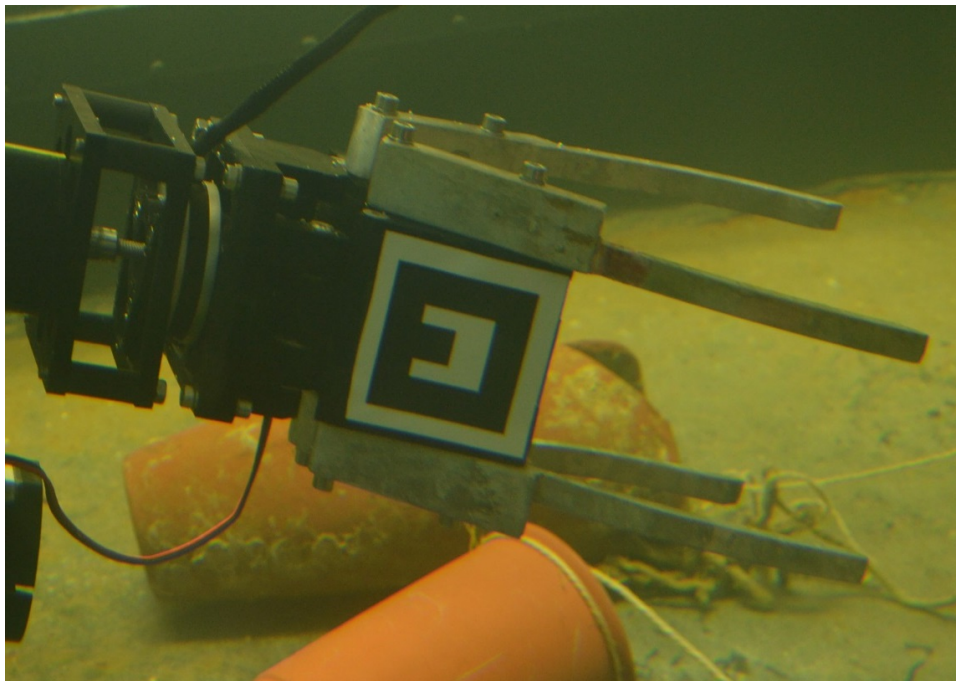


Figure 6: Grasping Execution: Optoforce sensor with 6 degrees of freedom, for underwater applications

that the gripper is applying to the object, a current control is used. Finally, the robot arm comes back to its home position, maintaining the object grasped.

In the following web address a video with one of the experiments is shown: <https://youtu.be/1jBZLyjvSLs>

6 Underwater Communications

The Merbots project requires the use of wireless communications to control the robot, if necessary, without using the umbilical.

Several experiments have been performed in this area, using both, Sonar, and Radio-Frequency modems.

A protocol for multimodal communication has been designed, which includes the possibility to link operator and robot by using different communication media. This protocol has been tested with real acoustics modems in the freshwater pool of the CIRS Lab (University of Girona) facilities, Girona.

In these experiments a pair of acoustic modems manufactured by the Evologics Company have been used. A S2CR 18/34 modem has been used to be the modem of the simulated HROV and a S2CR 18/34 USBL (Ultra Short Base Line) as the operator's modem.

The S2CR 18/34 modems provides data transfer rates up to 13.9 kbps in optimal conditions. These modems implements a data link protocol architecture created by Evologics, named D-MAC, and presented [Kebkal11]. This protocol provides two data delivery algorithms, the one based on sending short instant messages, and the burst mode. The results are very promising, and further work is to control a real underwater robot using radio-frequency modems at sea.

7 Conclusions and Further Work

This paper gives an overview of the current state of MERBOTS projects at UJI, giving an overall description of the project, and focusing on recent results related to multisensory autonomous perception, and grasping. Also, some keypoints related to communications are given. In fact, The system is able to transmit compressed images and telemetry to the user via radio-frequency and sonar techniques, in order to perform a supervised control of the autonomous intervention.

Further work will focus on cooperative manipulation, which includes the necessity of underwa-

ter real-time communications, supervised control, and more advanced techniques for perception and grasping

Acknowledgements

This work was partly supported by Spanish Ministry of Economy and Competitiveness under grant DPI2014-57746-C3-1-R (MERMANIP Project), and by Valencian Government under GVA-PROMETEO/2016/066 grant, and Jaume I University (P1-1B2015-68).

References

- [1] Pedrycz, W., (1993) Fuzzy sets and fuzzy systems, Research Setudies Press, england.
- [2] Zadeh, L., (1965) "Fuzzy logic", *Fuzzy Sets and Systems*, pp 100-106.
Deben estar ordenadas por orden alfabético y justificadas con la sangría correspondiente.
- [3] B. Gilmour, G. Niccum and T. O'Donnell, "Field resident AUV systems - Chevron's long-term goal for AUV development," 2012 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV), Southampton, 2012, pp. 1-5. doi: 10.1109/AUV.2012.6380718
- [4] Marani, G., Choi, S.K., Yuh, J.: Underwater autonomous manipulation for intervention missions AUVs. *Ocean Engineering* 36(1), 15-23 (2009). DOI 10.1016/j.oceaneng.2008.08.007.
- [5] M Prats, D Ribas, N Palomeras, J C García, V Nannen,  S Wirth, J J Fernández, J P Beltrán, R Campos, P Ridao, P J Sanz, G Oliver, M Carreras, N Gracias, R Mar  n, A Ortiz. Reconfigurable AUV for intervention missions: a case study on underwater object recovery. *Intelligent Service Robotics*, vol 5 (1), pp. 19-31, 2012. DOI: 10.1007/s11370-011-0101-z. Published online 4 October 2011: <http://www.springerlink.com/content/d715441x8885527g/>
- [6] M. Prats, D. Ribas, N. Palomeras, J. Garcia, V. Nannen, S. Wirth, J. J. Fernandez, J. Beltran, R. Campos, P. Ridao, P. Sanz, G. Oliver, M. Carreras, N. Gracias, R. Marin, and A. Ortiz, "Reconfigurable AUV for intervention missions: a case study on underwater object recovery," *Intelligent Service Robotics*, vol. 5, no. 1, pp. 19-31, 2012. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/s11370-011-0101-z>.
- [7] Mario Prats, Javier P   rez, J. Javier Fernández, Pedro J. Sanz, "An Open Source

Tool for Simulation and Supervision of Underwater Intervention Missions Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2577-2582, October 7-12, 2012. Vilamoura, Algarve, Portugal. 978-1-4673-1735-1/12/S31.00

- [8] Pedro Jose Sanz; Raul Marin; Jorge Sales; Gabriel Oliver; Pere Ridao. Recent advances in underwater robotics for intervention missions. Soller harbour experiments. Castellon (Spain): Low Cost Books, 2012. ISBN 978-84-940663-7-5.
- [9] O. Kebkal, M. Komar, K. Kebkal, and R. Bannasch, "D-mac: Media access control architecture for underwater acoustic sensor networks," in OCEANS2011 IEEE-Spain, June 2011, pp.1-8.
- [10] N. Palomeras, S. Nagappa, D. Ribas, N. Gracias, and M. Carreras, "Vision-based localization and mapping system for auv intervention," in 2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen, June 2013, pp.1-7.
- [11] E. Rubino, D. Centelles, Jorge Sales, Jose Vicente Marti Aviles, Raul Marin, Pedro Jose Sanz. Image compression with Region of Interest for Underwater Robotic Archaeological Applications. XXXVI Jornadas de Automatica (CEA IFAC 2015). Bilbao (Spain). 02-09-2015. Nacional. Cientific. 2015. Ed. (CEA). ISBN 9788415914129.

MARCADORES CUADRADOS Y DEFORMACIÓN DE OBJETOS EN NAVEGACIÓN QUIRÚRGICA CON REALIDAD AUMENTADA

Eliana Margarita Aguilar Larrarte

Universidad del Cauca, Popayán-Colombia, eaguilar@unicauca.edu.co

Oscar Andrés Vivas Albán

Universidad del Cauca, Popayán-Colombia, avivas@unicauca.edu.co

José María Sabater Navarro

Universidad Miguel Hernández, Elche-España, j.sabater@goumh.umh.es

Resumen

Este artículo muestra el resultado de pruebas preliminares con librerías y entornos de desarrollo comerciales encaminados a la construcción de una aplicación para navegación quirúrgica en el campo de la laparoscopia, usando marcadores cuadrados, extensible a despliegue en dispositivos móviles y gafas de realidad virtual. Para la renderización de los objetos 3D se usó el Game Engine Unity junto a la librería Vuforia. Las pruebas preliminares muestran resultados satisfactorios en el seguimiento de marcadores y en la construcción de la información aumentada para ser usada por el cirujano con deformación física de objetos en tiempo real.

Palabras Clave: Realidad aumentada, cirugía laparoscópica, aplicaciones móviles, deformación de objetos.

1 INTRODUCCIÓN

La cirugía mínimamente invasiva es un tipo de procedimiento operatorio que se realiza con instrumental miniaturizado introducido a través de pequeñas incisiones. El cirujano efectúa el procedimiento manipulando los instrumentos, guiado principalmente por la imagen transmitida gracias a una cámara endoscópica introducida por las pequeñas incisiones realizadas en el abdomen del paciente, la cual se encuentra equipada con una lámpara de luz fría [11].

La cirugía mínimamente invasiva ofrece importantes beneficios en la recuperación del paciente, disminuyendo el impacto físico de la intervención, pero conlleva importantes compromisos para los cirujanos debido a la miniaturización de los instrumentos y a las limitaciones visuales y táctiles, requiriendo gran experticia por parte de ellos [14]. Estas limitaciones se constituyen en una barrera como se evidencia en el estudio publicado en [15], en donde se muestran los resultados de una encuesta

diseñada para examinar las barreras de adopción de la laparoscopia por ginecólogos en ejercicio. La encuesta se aplicó a 4.273 cirujanos ginecológicos a través de los Estados Unidos. De dicho estudio se puede abstraer que de los cirujanos que pueden aconsejar intervenciones mínimamente invasivas más de la mitad (62.50%) no lo hace debido a las limitaciones visuales, y el 65.60% debido a la pérdida de visión binocular, convirtiéndose el aspecto visual en uno de los principales limitantes en la recomendación de una cirugía laparoscópica por parte de estos especialistas. Ante esta situación en los últimos años la tecnología ha incursionado en el campo quirúrgico mostrando un avance cada vez mayor, ya sea en el proceso de entrenamiento de cirujanos o asistiéndoles durante la intervención, creándose con el tiempo una buena variedad de sistemas de entrenamiento, asistencia y navegación. Para citar un caso, los sistemas de navegación quirúrgica construyen diagramas tridimensionales de datos médicos en tiempo real, ampliando la percepción visual, siendo de gran ayuda en los procesos de navegación quirúrgica [7], generando que las tecnologías computacionales tengan mayor futuro debido al aumento de la realidad y al acercamiento de ampliación con realidad mixta. En la última década las aplicaciones médicas de realidad aumentada (AR) han tenido una rápida expansión, originada principalmente por avances en el hardware (interfaces hápticas y despliegues), al mismo tiempo que los teléfonos inteligentes y tabletas se han constituido en herramientas cada vez más populares para aplicaciones en medicina, industria y educación [7].

El trabajo presentado en este artículo muestra un primer acercamiento a una aplicación móvil de realidad aumentada (MAR) para cirugía laparoscópica, usando la librería Vuforia para Unity, la cual permite desarrollar aplicaciones de realidad aumentada para Android o iOS, que sumado al motor de juego multiplataforma Unity permitió la construcción de una APK con seguimiento de marcadores cuadrados y deformación de objetos virtuales.

3. CIRUGÍA MINIMAMENTE INVASIVA

La cirugía laparoscópica al igual que otros tipos de cirugías mínimamente invasivas, trabaja bajo la disminución de las inserciones en el paciente usando instrumentos quirúrgicos especiales y un sistema de visión compuesto por una cámara y una lámpara de iluminación fría. Cámara y lámpara se conocen como endoscopio y junto con los otros instrumentos son insertados a través de pequeñas incisiones en la cavidad abdominal. La imagen del área de cirugía es desplegada en una pantalla y el cirujano es guiado principalmente por lo que ve en ella, manipulando los instrumentos y efectuando el proceso operatorio.

Este tipo de procedimiento quirúrgico evita cortes de gran extensión, pero debido a las características del método requiere alto nivel de experticia por parte del cirujano [8]. Muchos procedimientos quirúrgicos tradicionales han sido remplazados por esta técnica laparoscópica, dando origen a otras técnicas derivadas menos invasivas como es el caso de NOTES y LESS. Las cirugías NOTES (*Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery*) se realizan a partir de un acceso a la cavidad abdominal a través de orificios naturales del cuerpo humano como la boca, la nariz, el ano y la vagina [1], [6]. En tanto que LESS (*Laparo Endoscopic Single-Site Surgery*) es una técnica donde dicho acceso se realiza por una única incisión [1], [11].

2 REALIDAD AUMENTADA

La realidad aumentada tiene como finalidad sobreponer imágenes tridimensionales sobre las imágenes proporcionadas por las cámaras [2]. Esta técnica tiene como uno de sus mayores retos minimizar la diferencia entre el mundo real y el objeto virtual, y aumentar la percepción de la realidad en el sentido de que el observador pueda ver la misma escena. La realidad aumentada (AR) se diferencia de la realidad virtual (VR) en que en la primera el usuario mantiene la sensación de presencia en el mundo real mientras en la segunda se recrea un mundo virtual total.

La realidad aumentada tiene dos funciones: aumenta la percepción de la realidad (muestra la realidad, pero elige qué se puede ver y qué no), y crea un ambiente artificial (muestra lo que no es real permitiendo ver lo imaginario), con una percepción aumentada de información útil que ayuda a la toma de decisiones.

Los sistemas de AR se caracterizan porque tienen elementos reales y virtuales en un entorno real con alto grado de interactividad, y donde se tiene la opción de registrar y posicionar la información

virtual teniendo en cuenta la tridimensionalidad del mundo real [1] [3].

4. UNITY GAME ENGINE Y VUFORIA

El motor de videojuegos Unity es uno de los más usados para la creación de juegos interactivos en 2D, 3D y ambientes virtuales multiplataforma [5]. Unity incluye además del motor de videojuegos un ambiente integrado de desarrollo (IDE) y un *framework* de scripts orientado a objetos para tres lenguajes: Boo (un lenguaje de Unity similar a Python), JavaScript y C#, permitiendo además desarrollar aplicaciones web y juegos para consolas como Xbox, Wii, y PS3, así como aplicaciones para sistemas operativos iOS, Android, Windows, Mac OS y Linux.

Otra de las ventajas de Unity es su amplio soporte técnico debido a su popularidad [12]. Popularidad que ha hecho que tanto el *game engine* con su IDE estén siendo empleados con mayor demanda en aplicaciones de ingeniería y medicina [2], [3], [9], [13], [16], [17].

De otra parte Vuforia es una plataforma software que permite la creación de aplicaciones de realidad aumentada para iOS y Android junto a Unity 3D [10], y trabaja como un complemento de visión por computador.

5. METODOS

5.1 ARQUITECTURA

La tarea principal de la aplicación propuesta en este artículo es usar como despliegue un dispositivo móvil con sistema operativo Android, en este caso una tableta, asistiendo en la visualización de la cirugía laparoscópica con información adicional de realidad aumentada como se muestra en la Figura 1.

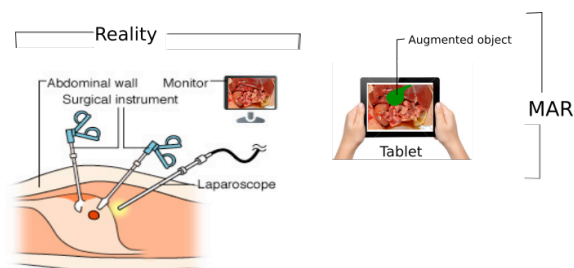


Figura 1: Esquema general del sistema propuesto

5.2 APLICACION

La aplicación de realidad aumentada en el dispositivo móvil (*Mobile Augmented Reality - MAR*) está

compuesta por dos partes: hardware y software. El hardware incluye el dispositivo que despliega simultáneamente el ambiente real del usuario y los objetos virtuales que aumentan la realidad, en este caso una tableta con sistema operativo Android u algún tipo de HoloLens. La segunda parte la constituye el software que incluye reconocimiento y seguimiento; el cual identifica el marcador visual a partir de sus características, captura el ambiente que el usuario ve y toma la posición del marcador y la cámara. Por último, renderiza los objetos 3D que hacen parte de la aumentación en tiempo real y los despliega también en tiempo real. La figura 2 muestra el diagrama de la creación de la imagen.

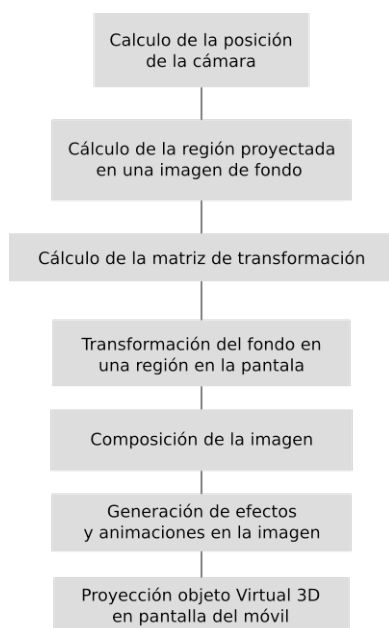


Figura 2: Diagrama de la creación de la imagen

Al importar la librería Vuforia de realidad aumentada en Unity, esta funciona como un *asset* (acción o complemento), y ya se pueden utilizar todos los recursos para realidad aumentada: reconocimiento de marcadores, marcadores de objetos previamente hechos, seguimiento de cámara AR, etcétera.

6. RESULTADOS

Para cumplir con los requerimientos de realidad aumentada en una aplicación, es necesario estimar la posición y orientación de la cámara con respecto al mundo real y viceversa. La combinación de posición y orientación es llamada “*pose*” y en este caso se utilizó la técnica de seguimiento o “*tracking*” de marcadores cuadrados (*marker-based tracking*).

6.1 MARKER BASED AR

Una de las áreas más trabajadas en el reconocimiento de marcadores es el reconocimiento de marcadores cuadrados (*border marker* o *fiducial marker*) en tiempo real, realizándose incluso en situaciones de difícil reconocimiento como al encontrarse el marcador girado o sesgado. Por lo tanto, este enfoque resulta ser el más popular y el primero en ser trabajado en proyectos de realidad aumentada.

Un marcador cuadrado es por lo general una imagen 2D impresa en una hoja de papel o superficie lisa. Ese tipo de marcadores son cuadrados y tienen un borde negro de tamaño visible. Durante la fase de seguimiento el sistema realiza una búsqueda de un rectángulo negro y solo si es identificado se procede a examinar el interior de la frontera para determinar el marcador real.

Dependiendo de las características del marcador se puede determinar la posición, escala y orientación con respecto a la cámara. En este caso la librería de realidad aumentada identificó marcadores cuadrados cuyas características son conocidas a partir de un proceso previo de extracción en tiempo real, y es a partir de esta identificación que se estima la posición relativa de la cámara. Este sistema está basado en un *framework* de seguimiento que proporciona los datos del reconocimiento y posición del marcador con respecto a la cámara, y en un *game engine* para la construcción del mundo virtual sobre Unity. Al desarrollar la aplicación móvil y fijar la cámara en el marcador se obtiene el despliegue en pantalla del objeto 3D relacionado a ese marcador. El objeto tridimensional entonces es hijo del “*image target*”. La captura de pantalla mostrada en la figura 3 permite ver un elemento tridimensional renderizado sobre un marcador cuadrado.

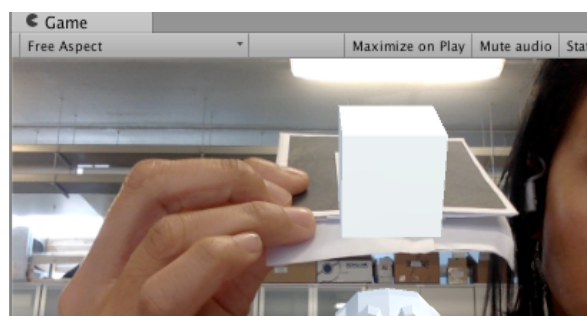


Figura 3: Objeto 3D sobre un marcador cuadrado

La prueba de deformación consistió en ubicar un objeto 3D en la realidad mixta con características plásticas, es decir que ante presencia de una fuerza de contacto su morfología se afecta, y en la no presencia de dicha fuerza el objeto recupera su forma. Es de aclarar que debido a que solo es una prueba se utilizó un modelo 3D previamente hecho, en este caso el

modelo típico de Blender en forma de cabeza de mono. Ese modelo 3D se importó en el proyecto de Unity ubicándolo en un lugar central dentro de la imagen de la cámara de realidad aumentada. Se trabajó también con otro objeto 3D, un cubo, usando la herramienta de Unity para creación de objetos 3D. Dicho cubo se asoció al marcador de AR. Se crearon los *scripts* necesarios para que al ser movido el marcador físico el desplazamiento del cubo fuera similar, y al ser tocada la cabeza del mono (objeto 3D importado de Blender) con el cubo, esta se deformara como se observa en figura 4.

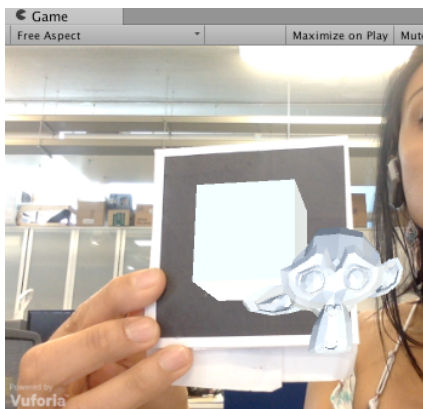


Figura 4. Prueba de deformación entre objetos en el entorno de realidad aumentada

6.1 OBJETO AR CON INTERACCIONES DEFORMANTES

La deformación simulada de la vesícula como una superficie deformable en Unity, constituyó la segunda prueba que involucró la construcción de una superficie de vértices deformables de manera individual, la cual se creó a partir de una red de vértices y una superficie de conexión entre ellos. Es importante tener una buena cantidad de vértices no solo para presentar una mejor apariencia en el objeto tridimensional, sino también porque permitirá una deformación más natural del objeto.

El objeto deformable (vesícula) fue realizado con Blender y luego importado dentro de Unity. La vesícula se convierte en una superficie deformable realizando un *script* que modifica el comportamiento de los vértices de acuerdo a la interacción con otro objeto 3D. La primera acción es acceder a la malla de vértices y copiar las posiciones iniciales de ellos sin deformación, guardando aquellos valores en un vector. Para simular el comportamiento de los vértices y de la superficie en su totalidad, se tuvo como referencia la posición original de los vértices del objeto sin deformación y el actual desplazamiento de los vértices modificados por la interacción.

Los vértices se mueven con cierta velocidad (dependiendo de la fuerza de contacto), y por lo tanto se debe obtener ese valor en cada momento. Para controlar cómo la malla es deformada se usa una entrada interactiva (ya sea el toque con otro objeto o un toque en pantalla como se describirá más adelante), relacionando este toque con una fuerza que modifica la posición y velocidad de los vértices.

Otro cuerpo 3D (cubo) se asoció con el marcador AR. En cuanto ese otro cuerpo está en contacto con la superficie deformable, los vértices de este se mueven con una fuerza inicial que afecta fuertemente a los vértices más cercanos al punto de toque, y en menor proporción a los más alejados, como se observó en la figura 4. Cada vértice afectado retorna a su posición inicial con una fuerza restaurativa y un coeficiente de amortiguamiento, una vez el efecto deformador desaparece.

De las librerías físicas de Unity solo se usó la función llamada *mesh collider* para detectar la zona de contacto, en tanto que el comportamiento de los vértices se generó con el *script* codificado para el objeto deformable.

Otro *script* es asociado con el cuerpo del marcador AR y contiene la detección del toque con el objeto 3D (cubo), y las constantes iniciales para el cálculo de la fuerza.

Posteriormente una vesícula virtual fue relacionada a un nuevo marcador sobre un hígado sintético en el mundo real. Se realizó el ejecutable de la aplicación móvil (apk) y se instaló en la tableta. La tableta Samsung tab2 fue ubicada en un robot y la cámara alineada con la vista del hígado sintético. Dicho montaje se realizó en el laboratorio del grupo nBIO (Grupo de investigación en Neuroingeniería Biomédica) de la Universidad Miguel Hernández, en Elche, España, sobre un robot de asistencia quirúrgica actuando sobre una caja de entrenamiento laparoscópico como se puede ver en la Figura 5.

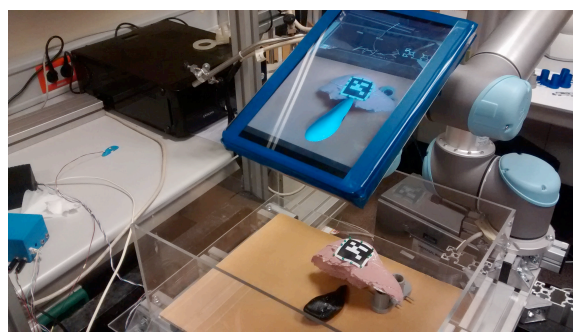


Figura 5: Fotografía de montaje con el dispositivo de despliegue y marcador físico ubicado en el hígado sintético

Con el fin de probar la deformación de la superficie en el *script* de detección de colisión, se incluyó una funcionalidad para simular la deformación de la vesícula ante un toque en la pantalla de la tableta, tal como se puede observar en la figura 6, de tal manera que cuando se toque la pantalla del móvil la vesícula virtual sufra deformación.



Figura 6: Toque de la pantalla y deformación de la vesícula virtual

7. CONCLUSIONES

La realidad aumentada es una técnica que puede ser usada como herramienta para facilitar el posicionamiento visual de cirujanos dentro de operaciones laparoscópicas, permitiendo sumar información creada de forma artificial, ubicándola dentro del campo visual que es proporcionado por la cámara endoscópica. Este tipo de trabajos permiten una representación más intuitiva del campo de trabajo al cual se enfrenta el cirujano.

En este trabajo se realizó una prueba estándar con marcadores cuadrados también llamados “*border markers*”, usando la librería Vuforia de realidad aumentada y como base el entorno integrado de desarrollo (IDE) de Unity, así como su motor multiplataforma de videojuegos.

Como resultado se tiene que la elección de Vuforia como librería de reconocimiento de marcadores para realidad aumentada, y de Unity como IDE de desarrollo, resulta ser satisfactoria para marcadores cuadrados. El seguimiento del marcador es rápido y la aplicación para el sistema operativo Android resulta ser muy estable. Uno de los mayores obstáculos en el uso de esta librería radica en la exigencia de extracción previa de las características del marcador, la cual se realiza con una aplicación web proporcionada por los fabricantes de Vuforia y que es llamada “*target manager*”. Dicha aplicación entrega una base de datos de las características del marcador, la cual es importada en Unity y que sin duda proporciona un reconocimiento rápido de él. Sin embargo, se evidencia la necesidad de usar otra

librería de visión que permita mayor flexibilidad en el manejo de los algoritmos para la identificación y seguimiento de marcadores naturales. En cuanto al IDE de desarrollo, el resultado de adicionar interacciones físicas en los objetos aumentados resulta ser totalmente posible y estable.

Para trabajos futuros se plantea el uso del IDE de Unity con el complemento de OpenCV para Unity, debido principalmente a la necesidad de implementar mejores técnicas en los algoritmos de extracción de características y esquemas de seguimiento basados en aprendizaje de máquina, que permitan una mejor ubicación de los elementos virtuales en la realidad mixta. De esta manera se ampliará el trabajo a marcadores naturales.

Agradecimientos

“C-HALS” – Referencia: DPI2013-47196-C3-2-R [AEI/FEDER, UE], financiado por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) y por la Unión Europea a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional - FEDER – “Una manera de hacer Europa”

Referencias

- [1] Autorino, R., Cadeddu, J. A., Desai, M. M., Gettman, M., Gill, I. S., Kavoussi, L. R., ... & Kaouk, J. H. (2011). Laparoendoscopic single-site and natural orifice transluminal endoscopic surgery in urology: a critical analysis of the literature. *European Urology*, 59(1), pp. 26-45.
- [2] Bae, J. H. (2016). Development of smart game based on multi-platform game engine. *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 11(3), pp. 345-350.
- [3] Cristie, V., Berger, M., Bus, P., Kumar, A., & Klein, B. (2015). CityHeat: visualizing cellular automata-based traffic heat in Unity3D. *SIGGRAPH Asia 2015 Visualization in High Performance Computing*, p. 6. ACM.
- [4] Ćuković, S., Gattullo, M., Pankratz, F., Devedžić, G., Carrabba, E., & Baizid, K. (2016). Marker based vs. natural feature tracking augmented reality visualization of the 3D foot phantom. *Electrical and Bio-medical Engineering, Clean Energy and Green Computing*, 1(1), p. 8.
- [5] Fürst, J., Fierro, G., Bonnet, P., & Culler, D. E. (2014). BUSICO 3D: building simulation and control in unity 3D. *12th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems*, pp. 326-327.

- [6] Kipper, G., & Rampolla, J. (2012). *Augmented Reality: an emerging technologies guide to AR*. Elsevier.
- [7] Marescaux, J., & Diana, M. (2015). Next step in minimally invasive surgery: hybrid image-guided surgery. *Journal of pediatric surgery*, 50(1), pp. 30-36.
- [8] Moreno, M. R., Moraes, T. F., Amorim, P. H., da Silva, J. V. L., & Rodriguez, C. A. (2012). Virtual open source environment for training and simulation of laparoscopic surgery. In *XII Work-shop de Informática Médica (WIM2012)— XXXII Congresso da Sociedade Brasileira de Computação*, pp. 1-4.
- [9] Narahara, T., Abbruzzese, K. M., & Foulds, R. A. (2015). Haptic collaboration: biomedical engineering meets digital design. *SIGGRAPH 2015*, p. 20. ACM.
- [10] Peng, H. (2015). Application Research on Face Detection Technology based on OpenCV in Mobile Augmented Reality. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 8(4), pp. 249-256.
- [11] Rané, A., Rao, P., & Rao, P. (2008). Single-port-access nephrectomy and other laparoscopic urologic procedures using a novel laparoscopic port (R-port). *Urology*, 72(2), pp. 260-263.
- [12] Simonetti Ibañez, A., & Paredes Figueras, J. (2013). *Vuforia v1. 5 SDK: Analysis and evaluation of capabilities* (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, España).
- [13] Soto, C., Vargas, M., Uribe-Quevedo, A., Jaimes, N., & Kapralos, B. (2015). A stereoscopic 3d human eye examination app. *International Conference on Interactive Mobile Communication Technologies and Learning (IMCL)*, pp. 236-238.
- [14] Van der Pas, M. H., Haglind, E., Cuesta, M. A., Fürst, A., Lacy, A. M., Hop, W. C., & Bonjer, H. J. (2013). COlorectal cancer Laparoscopic or Open Resection II (COLOR II) Study Group Laparoscopic versus open surgery for rectal cancer (COLOR II): short-term outcomes of a randomised, phase 3 trial. *Lancet Oncol*, 14(3), pp. 210-8.
- [15] Weizman, N. F., Maurer, R. M. A., Einarsson, J. I., Vitonis, A. F., & Cohen, S. L. (2014). Survey on Barriers to Adoption of Laparoscopic Surgery. *Journal of Minimally Invasive Gynecology*, 21(6), p. S46.
- [16] Woo, J. H., Peterson, M. A., & Gleason, B. (2016). Developing a Virtual Campus Model in an Interactive Game-Engine Environment for Building Energy Benchmarking. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 30(5), p.C4016005.
- [17] Zhong, H., & Xiao, J. (2015). Apply technology acceptance model with big data analytics and unity game engine. *6th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)*, pp. 19-24.

Entrenamiento robótico de la marcha en pacientes con Parálisis Cerebral: definición de objetivos, propuesta de tratamiento e implementación clínica preliminar

C. Bayón¹, O. Ramírez¹, E. Rocon¹

¹Grupo de Ingeniería Neural y Cognitiva, Centro de Automática y Robótica, CAR-CSIC-UPM
cristina.bayon@csic.es

T. Martín-Lorenzo², B. Moral-Saiz², A. Pérez-Somarriba², S. Lerma-Lara², I. Martínez²

²Hospital Infantil Universitario Niño Jesús

Resumen

El uso de dispositivos robóticos para rehabilitación de la marcha se ha incrementado en los últimos años de manera notable. Sin embargo, hay una falta de estudios que proporcionen pautas detalladas sobre cómo usar la robótica de rehabilitación para obtener los máximos beneficios del tratamiento. Esta contribución presenta un programa de entrenamiento detallado para rehabilitación robótica de la marcha de niños con Parálisis Cerebral (PC). Éste está centrado en la consecución de diferentes especificaciones de la International Classification of Functioning, Disability and Health framework, Children and Youth version (ICF-CY). El programa de entrenamiento se divide en 16 sesiones, en las que los pacientes trabajan control motor, fuerza y potencia en sus extremidades inferiores. Resultados de una validación clínica con 4 pacientes pediátricos muestran mejoras en diferentes aspectos de la marcha, tales como velocidad, fuerza, longitud de paso o desempeño según la Gross Motor Function Measure-88. Este estudio fue registrado públicamente con el número ISRCTN18254257 el 23 de Marzo de 2017.

Palabras Clave: Entrenamiento robótico, Terapia, Parálisis Cerebral, Exoesqueleto, Rehabilitación

1 INTRODUCCIÓN

La limitación de la marcha es uno de los mayores problemas sufridos por niños con Parálisis Cerebral (PC) [1]. Ello es consecuencia de un daño producido en el sistema nervioso central (SNC) del paciente, y por tanto, se requiere un entrenamiento funcional óptimo para maximizar las mejoras debidas a la terapia [2], lo que por ende, provocará efectos positivos en la calidad de vida de los pacientes y sus familias [3].

En las últimas décadas, el auge en el desarrollo de exoesqueletos robóticos [4–6], unido a las novedosas estrategias de control para rehabilitación que adaptan la terapia a las necesidades del usuario, ofrece posibilidades prometedoras para intensificar las mejoras debidas al tratamiento robótico [7,8]. Sin embargo, en el caso de población infantil, no existen suficientes evidencias que aseguren que la terapia robótica actual ofrezca mejores resultados por sí misma respecto a la terapia física convencional [9]. Por tanto, son necesarios nuevos enfoques que permitan mejorar la rehabilitación en estos pacientes jóvenes, haciendo de la terapia robótica una clave del cambio.

Una de las mayores limitaciones del uso de la tecnología en la práctica clínica, aparte del elevado coste, es la ausencia de estudios que describan un programa de entrenamiento robótico detallado. La amplia variedad de cambios que pueden ser aplicados a los parámetros de la terapia robótica, dificulta el hecho de especificar los ajustes para llevar a cabo la mejor solución posible. Además, la mayoría de los estudios actuales centran la terapia en las extremidades inferiores exclusivamente, pero teniendo en cuenta que la marcha está influenciada también por la postura superior del cuerpo [10], un programa de entrenamiento adecuado no debería ignorar las funciones de cabeza y tronco durante la marcha.

Esta contribución presenta un detallado programa de entrenamiento de la marcha basado en robots para PC, el cual está basado en la consecución de diferentes especificaciones de la International Classification of Functioning, Disability and Health framework, Children and Youth version (ICF-CY) [11]. Ello contribuirá con respuestas precisas a cómo implementar robótica de rehabilitación siguiendo una guía definida. Finalmente, la terapia propuesta es validada en cuatro pacientes con PC utilizando para ello la plataforma CPWalker [5].

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 DISPOSITIVO DE REHABILITACIÓN

La plataforma robótica CPWalker es un dispositivo de rehabilitación de la marcha compuesto por un exoesqueleto unido a un andador, el cual permite entrenamiento con desplazamiento real [5]. Tiene implementado un sistema de control parcial de peso del paciente (PBWS), y a través de controladores individuales por articulación, proporciona un alto grado de adaptación a las capacidades del usuario.

En concreto, cada articulación del exoesqueleto puede trabajar siguiendo los modos de control representados en la Figura 1, que de menor a mayor colaboración del paciente son: i) control de posición (P); ii) control de alta impedancia (AI); iii) control de media impedancia (MI); iv) control de baja impedancia (BI); y v) control de fuerza (F).

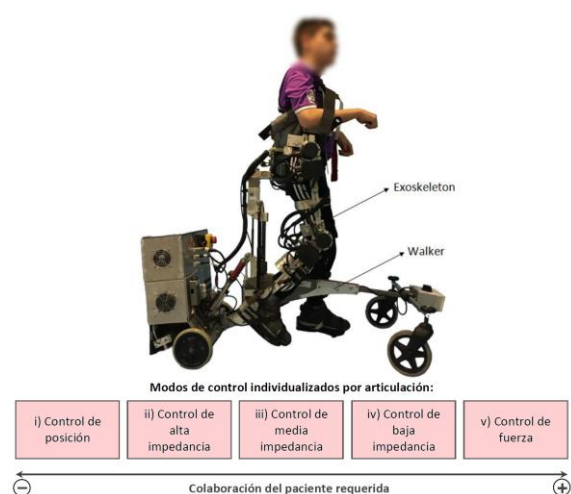


Figura 1. Dispositivo robótico CPWalker (exoesqueleto + andador) y posibles modos de control por articulación

Además del modo de control, el terapeuta puede seleccionar otros parámetros y variables dentro de cada sesión de tratamiento: PBWS, velocidad de marcha y porcentaje de rango de movimiento (ROM). Por otro lado, CPWalker también incluye una estrategia de biofeedback destinada a motivar al paciente para corregir activamente su postura de cabeza y tronco durante la marcha [5,7].

La variedad de modos de control, el número de parámetros ajustables, la facilidad para seleccionar variables de forma individualizada y la posibilidad de implementar diferentes estrategias relacionadas con la marcha en tiempo real, hacen que CPWalker sea una plataforma ideal para validar la propuesta de tratamiento robótico que presenta este manuscrito.

2.2 PROGRAMA DE ENTRENAMIENTO ROBÓTICO

Como se ha comentado en puntos anteriores, la propuesta de entrenamiento robótico está centrada en mejorar las principales funciones de la marcha derivadas de la ICF-CY [11]. Concretamente, los objetivos seleccionados de esta clasificación internacional son: i) movilidad y estabilidad de las articulaciones (b710, b715); ii) potencia muscular (b730); iii) resistencia muscular (b740); iv) control del movimiento voluntario (b760); v) patrón de marcha (b770); vi) conservación de la postura del cuerpo (d415); vii) desempeño de la marcha (d450); viii) funciones propioceptivas (b260); y ix) relaciones personales (d740).

Para alcanzar los objetivos anteriores, los autores realizaron previamente un estudio basado en la National Strength and Conditioning Association (NSCA) youth training guidelines [12], la cual sugiere que ejercicios explosivos de fuerza excéntrica deberían ser el comienzo de un entrenamiento adecuado para asegurar una mayor potencia muscular, con la posterior transferencia de las ganancias a la función de la marcha. De este modo, se determina que los ejercicios del tratamiento propuesto han de ser "multi-articulación", variando su intensidad dependiendo si se trabaja fuerza o potencia: la fuerza llevará asociada ejercicios de una carga alta con velocidad baja, mientras la potencia se trabajará con baja carga pero alta velocidad de movimiento.

De acuerdo con los objetivos de la ICF-CY y cumpliendo con los requisitos de la NSCA, el tratamiento robótico fue conceptualizado en dos *fases*, en las cuales las variables ROM, PBWS y velocidad fueron los principales parámetros bajo variación (Figura 2). Los pacientes entrenaron 2 días no consecutivos por semana, durante un total de 8 semanas (16 sesiones, Figura 2), con el objetivo de cumplir con el número de sesiones necesario para generar cambios neurales significativos [13]. Las sesiones consistieron en un calentamiento previo de 10-15 minutos, seguido de ejercicio de suelo con CPWalker durante 60 minutos, incluyendo finalmente 3 minutos de marcha autónoma como enfriamiento. Una descripción de cada *fase* de 8 sesiones sigue:

i. *Primera fase* (sesión 1 a 8): esta fase trató principalmente de mejorar el control motor, enseñando al paciente la secuencia correcta del movimiento e incrementando la fuerza. Se pidió a los pacientes seguir el movimiento proporcionado por el exoesqueleto con la mínima resistencia posible, empujando el suelo en cada paso e

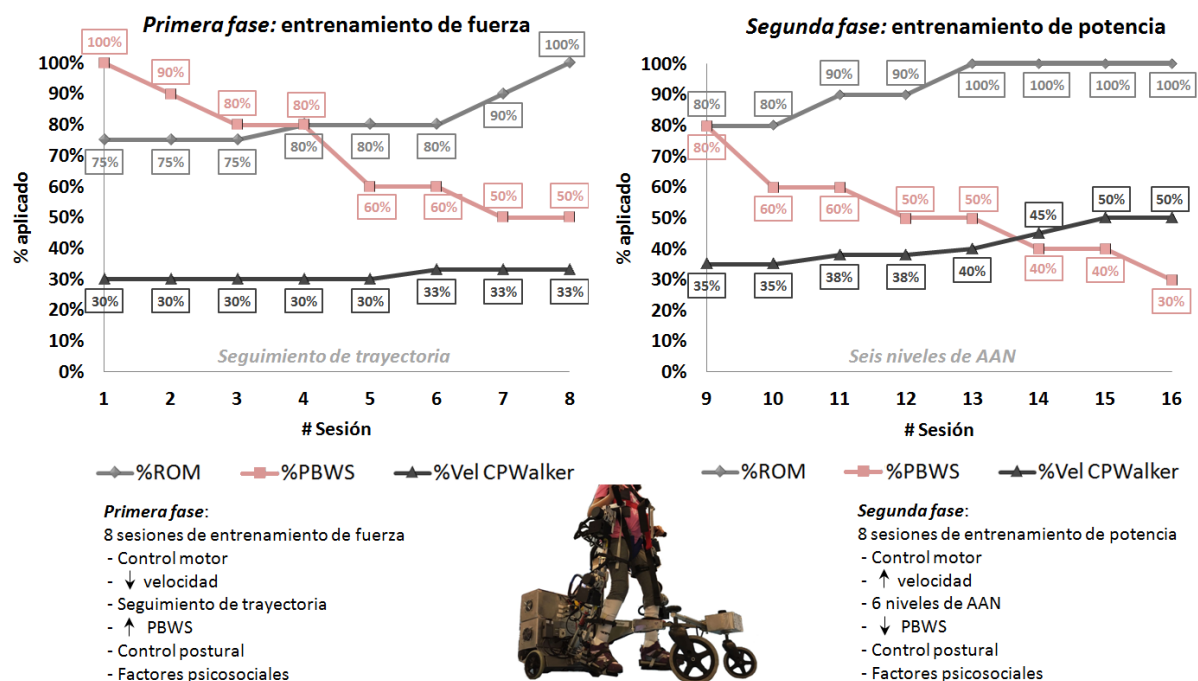


Figura 2. Visión general del programa de entrenamiento robótico. *Primera fase*: sesiones 1 a 8; *Segunda fase*: sesiones 9 a 16. Se hizo una evaluación del progreso de los pacientes antes de comenzar el tratamiento, después de la *primera fase* y al finalizar la *segunda fase*. Las variaciones de velocidad están representadas en porcentajes respecto al total de CPWalker que corresponde con 0.6 m/s.

intentando mantener la máxima flexión y extensión al final de cada ciclo de la marcha. Se dio instrucciones a los niños para hacerles comprender de una mejor forma el patrón de marcha, y durante las sesiones se proporcionó apoyo verbal. Durante toda esta *fase* el modo de control en todas las articulaciones del exoesqueleto fue un control de posición, progresando hacia menor PBWS y mayor ROM a medida que las sesiones eran superadas (Figura 2). El progreso de los parámetros a lo largo de las sesiones fue implementado cuando el personal clínico así lo consideró dependiendo de los niveles de espasticidad, fatiga y control motor presentados en la última sesión realizada. Si el paciente no estaba preparado para saltar al siguiente desafío, la sesión era repetida con los mismos porcentajes anteriores. Se seleccionaron momentos aleatorios de la primera sesión en los que se taparon los ojos del paciente para que éste pudiese sentir la realización del movimiento.

ii. *Segunda fase* (sesión 9 a 16): el objetivo de esta fase fue seguir entrenando el control motor pero ahora incrementando la potencia muscular al mismo tiempo. La contribución del paciente fue muy importante en esta fase para desarrollar neuroplasticidad y preservar la ganancia de control motor obtenida en la *primera fase* [14]. De este modo, se implementaron diferentes niveles de asistencia según necesidad (AAN) relacionados con los distintos modos de control de CPWalker [5] (Tabla 1). El ROM inicial de esta *fase* fue seleccionado al 80%, y alcanzó el 100% en la sesión

13, tiempo en el cual la velocidad fue incrementada (Figura 2). Además, el PBWS de esta fase llegó hasta el 30% del peso total del paciente.

Tabla 1. Niveles de asistencia en cada articulación del exoesqueleto según la fase de tratamiento implementada

	1ª fase		2ª fase					
Nivel	0	1	2	3	4	5	6	
Cadera	P	AI	MI	MI	MI	LI	LI	
Rodilla	P	P	P	AI	MI	MI	LI	

Durante ambas *fases*, la posición de la cabeza y el tronco de los pacientes fueron monitorizadas a través de la estrategia de control postural de CPWalker. Se proporcionó un feedback acústico cada vez que estas posiciones fueron inapropiadas, lo que ayudó a motivar a los niños a mantener una postura correcta durante la marcha rectificando por ellos mismos en caso de ser necesario. Este ejercicio postural permite facilitar el desarrollo de cualquier actividad de la vida diaria, mejora la interacción social del paciente, la participación y la comunicación [10,15].

2.3 MÉTRICAS

Con el objetivo de medir de forma objetiva la evolución de los pacientes, y debido a la falta de homogeneidad entre niños con PC, los autores decidieron evaluar la progresión de la terapia

comparando cada paciente consigo mismo en lugar de mantener un grupo de control. Así los análisis y métricas de evaluación representados en la Tabla 2 se llevaron a cabo para cada usuario en tres ocasiones: antes de comenzar el tratamiento (pre), después de 8 sesiones (medio) y al finalizar el conjunto de 16 sesiones (post).

Tabla 2. Métricas de evaluación y momento de aplicación

Métrica	Pre	Medio	Post
Test 10 m (10mwt) [16]	*	*	*
Test 6 min (6mwt) [17]	*	*	*
Análisis 3D de marcha	*	*	*
Medida fuerza isométrica máxima	*	*	*
Evaluación control selectivo extremidades inferiores (SCALE) [18]	*	*	*
GMFM-88, dimensiones D y E [19]	*		*
Kinesiofobia	*		*
Cuestionario evaluación funcional Gillette [20]	*		*
Motivación del paciente	Durante cada una de las sesiones		

2.4 PACIENTES

Cuatro pacientes con PC espástica (dos niños, dos niñas, peso 44.75 ± 6.29 kg, altura 1.56 ± 0.29 m y edad 14.50 ± 2.38 años) fueron seleccionados para formar parte del estudio (P1, P2, P3 y P4 en Tabla 3). Los criterios de inclusión para el reclutamiento de pacientes fueron: i) niños entre 11 y 18 años que sufran de diplegia espástica; ii) niveles de la Gross Motor Function Classification System (GMFCS) entre I y IV; iii) peso máximo 75kg; iv) medidas antropométricas de las extremidades inferiores de acuerdo a las limitaciones del exoesqueleto de CPWalker; v) capaces de entender los ejercicios propuestos; y vi) capaces de avisar si surge dolor. Los criterios de exclusión fueron: i) pacientes que hubieran recibido tratamientos concomitantes en un período de 3 meses antes del estudio (ej. cirugía ortopédica o toxina botulínica); ii) niños con deformidades musculoesqueléticas o lesiones superficiales en las extremidades inferiores que puedan ser un problema para el uso del exoesqueleto; iii) pacientes con alteraciones críticas del control

motor como distonía, coreoatetosis o ataxia; iv) comportamientos agresivos; y v) discapacidades cognitivas severas.

El estudio fue llevado a cabo en el Hospital Infantil Universitario Niño Jesús. El Comité de Ética del hospital dio la aprobación del estudio (R-0032/12), garantizando su cumplimiento con la Declaración de Helsinki. Todos los participantes fueron informados y se requirió un consentimiento informado parental antes de comenzar el tratamiento.

Tabla 3. Descripción de los pacientes

Paciente	Género	Edad	GMFCS	Peso (kg)	Altura (m)
P1	Femenino	12	III	40	1.56
P2	Femenino	16	II	42	1.60
P3	Masculino	17	III	54	1.53
P4	Masculino	13	II	43	1.55

3 RESULTADOS

Debido a razones no relacionadas con el estudio, tres de los cuatro pacientes (P1, P2 y P4) completaron 15 del total de 16 sesiones. Concretamente, P1 perdió la sesión 8, P2 la sesión 7 y P4 la 11. El resto del tratamiento fue completado de forma exitosa.

Las modificaciones de parámetros propuestas en la Figura 2 fueron completadas sin problemas por todos los pacientes. Sin embargo, cada usuario progresó de forma independiente en cuanto a los niveles de asistencia de la Tabla 1 (ver Figura 3).

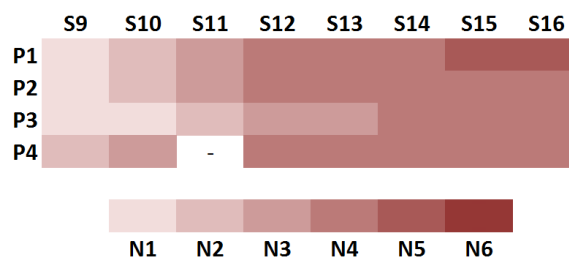


Figura 3. Niveles de asistencia (N1-N6) dependiendo del progreso del paciente en las sesiones de la segunda fase del tratamiento. El paso de un nivel a otro fue dado cuando el paciente alcanzó al menos el 85% del patrón implementado en cada sesión. El nivel para P4 en la sesión 10 no está representado porque este paciente perdió la sesión.

3.1 VELOCIDAD DE MARCHA, RESISTENCIA Y RESPUESTAS GLOBALES

Todos los pacientes mejoraron los resultados en las dimensiones D y E de la GMFM-88. La comparación de los estudios pre y post en esta escala, muestra

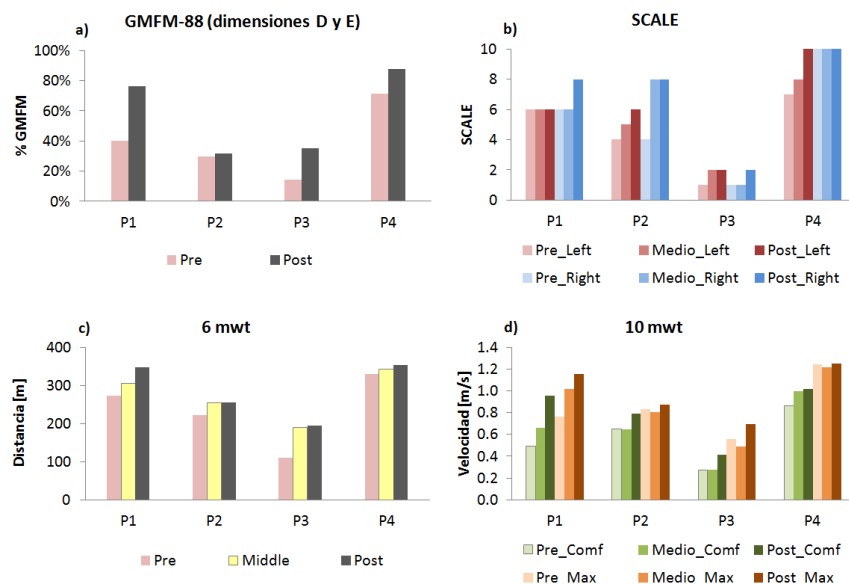


Figura 4. (a) Resultados de la GMFM-88 en dimensiones D y E, (b) SCALE, (c) 6mwt, y (d) 10mwt para los análisis pre, medio y post en los pacientes P1 a P4. La medida de SCALE fue medida bilateralmente (izquierda y derecha). El test de los 10m fue realizado en dos situaciones: velocidad confortable y velocidad máxima.

mejoras del 36.60% para P1, 1.87% para P2, 20.81% para P3 y 16.23% para P4 (Figura 4-a).

La evaluación SCALE también mostró resultados favorables al final del tratamiento robótico (Figura 4-b), donde la mayoría de medidas fueron incrementadas o mantenidas en el nivel máximo de 10 puntos.

Finalmente, tanto la distancia caminada en el 6mwt como la velocidad alcanzada en el 10mwt se incrementaron después del período de rehabilitación (Figura 4-c y d). En el 10mwt se evaluaron dos situaciones: velocidad confortable y velocidad máxima. Las progresiones concretas de cada paciente fueron: P1 (6mwt: 26.92%; 10mwt_{comf}: 94.69%; 10mwt_{max}: 51.84%); P2 (6mwt: 14.86%; 10mwt_{comf}: 21.85%; 10mwt_{max}: 5.18%); P3 (6mwt: 75.68%; 10mwt_{comf}: 52.21%; 10mwt_{max}: 24.60%) and P4 (6mwt: 7.27%; 10mwt_{comf}: 18.60%; 10mwt_{max}: 0.81%).

3.2 PROGRESIÓN DE LA FUERZA

Para cuantificar la fuerza máxima realizada por cada paciente, se tomaron tres medidas con un dinamómetro manual microFET2 (Hoggan Scientific LLC, USA) para diferentes movimientos requeridos: dorsiflexión, flexión plantar, flexión-extensión de rodilla, flexión-extensión de cadera, abducción y adducción. Posteriormente, se realizó la media de las medidas tomadas. Concretamente, las mejoras generales (incluyendo todos los movimientos requeridos) fueron: P1: $129.77 \pm 58.71\%$; P2: $61.39 \pm 58.55\%$; P3: $70.54 \pm 83.68\%$ and P4: $34.41 \pm 30.41\%$.

3.3 VARIABILIDAD CINEMÁTICA Y ESPACIOTEMPORAL

El análisis cinemático de la marcha en 3D, y en concreto los índices "Gait Profile Score" (GPS) y "Gait Deviation Index" (GDI), dan una visión del acercamiento de la marcha de un paciente respecto a la normalidad. Como puede observarse en la Figura 5, todos los pacientes obtuvieron resultados más cercanos a la normalidad en ambos índices para ambas extremidades (izquierda y derecha), comparando los análisis pre y post.

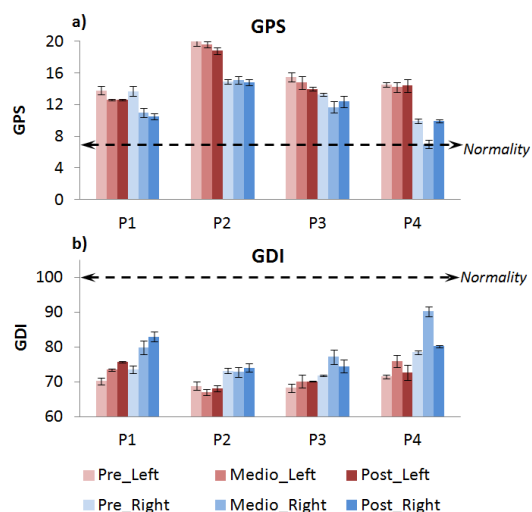


Figura 5. (a) GPS y (b) GDI para los análisis pre, medio y post en los pacientes P1 a P4. Las gráficas muestran la media \pm desviación estándar de forma bilateral. La normalidad en GPS (<7) y en GDI (>100).

En cuanto a la media de mejoras para los cuatro pacientes en los parámetros espaciotemporales, fueron: $21.46 \pm 33.79\%$ en velocidad media, $2.84 \pm 13.96\%$ para cadencia y $17.95 \pm 20.45\%$ en longitud de paso.

3.4 VARIABLES CUALITATIVAS

La motivación de los usuarios fue evaluada por el personal encargado del estudio cada día de terapia. La medida media de motivación alcanzada por cada paciente en una escala de 0 a 10 puntos fue: 9.4 para P1, 8.6 para P2, 9.44 para P3 y 8.87 para P4. Además, tres de los cuatro pacientes disminuyeron su índice de kinesiofobia después de las 16 sesiones robóticas.

Los familiares de los cuatro pacientes rellenaron un cuestionario de evaluación funcional (Gillette) al comienzo del tratamiento y al final del mismo. Los resultados de estos cuestionarios muestran que todos los familiares piensan que la fuerza y la movilidad de los pacientes mejoró gracias a la terapia robótica. Además, la mitad de ellos incluyeron la resistencia como otro de los parámetros mejorados en el tratamiento. El 100% de los familiares encuestados se mostraron satisfechos con la terapia llevada a cabo en CPWalker, y aseguraron que la volverían a repetir.

Respecto a la opinión de los pacientes, en general todos los niños describieron el tratamiento como "muy divertido", "el robot te hace sentirte más independiente y ligero" y "seguro".

4 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El principal objetivo de este paper fue proporcionar una primera aproximación sobre la implementación de una terapia robótica definida, la cual pueda cubrir los aspectos clínicos más importantes de la ICF-CY. Esta propuesta fue evaluada en cuatro pacientes pediátricos con PC, lo cual proporcionó resultados preliminares de nuestra investigación.

De acuerdo a los resultados, las mejoras más importantes correspondieron a los pacientes P1 y P3, que por su parte eran los niños con niveles más afectados de la GMFCS (III en ambos casos). En general, se alcanzaron valores más altos de velocidad de marcha y respuestas globales en distintos test realizados.

La parte más importante del tratamiento fue la *segunda fase*, donde se adaptó el nivel de asistencia a cada usuario según su progreso en la terapia.

Las mayores contribuciones de esta propuesta se dan en la posibilidad de ejercitar diferentes funciones de la marcha de una forma ordenada, individualizada por articulación y al mismo tiempo que se desarrolla un entrenamiento con desplazamiento real. Respecto al control postural llevado a cabo en paralelo al entrenamiento de marcha, consideramos que fue un factor clave del estudio.

Esta propuesta de tratamiento robótico puede ser implementada en cualquier dispositivo de rehabilitación de la marcha preparado para ello.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto de Biomecánica de Valencia su colaboración en el desarrollo del proyecto CPWalker. También se aprecia el aporte de la doctora Deborah Gaebler en el desarrollo de la propuesta de tratamiento.

Agradecemos a la empresa Made for Movement por su donación con el dispositivo NF-Walker.

Finalmente, damos gracias a todos los pacientes y familiares que colaboraron en este estudio.

Referencias

- [1] Palisano R, Rosenbaum P, Walter S, Russell D, Wood E, Galuppi B. Gross Motor Function Classification System. *Dev Med Child Neurol* 1997;39:214–23.
- [2] Dietz V. Clinical Aspects for the Application of Robotics in Locomotor Neurorehabilitation. In: Reinkensmeyer DJ, Dietz V, editors. *Neurorehabilitation Technol.*, Springer; 2016, p. 209–21. doi:10.1007/978-3-319-28603-7_11.
- [3] Meyer-Heim A, van Hedel HJ a. Robot-assisted and computer-enhanced therapies for children with cerebral palsy: current state and clinical implementation. *Semin Pediatr Neurol* 2013;20:139–45. doi:10.1016/j.spen.2013.06.006.
- [4] van Asseldonk EHF, van der Kooij H. Robot-Aided Gait Training with LOPES. In: Dietz V, editor. *Neurorehabilitation Technol.*, London: Springer London; 2012, p. 379–96. doi:10.1007/978-1-4471-2277-7_21.
- [5] Bayón C, Ramírez O, Serrano JI, Castillo MD Del, Pérez-Somarriba A, Belda-Lois JM, et al. Development and evaluation of a novel robotic platform for gait rehabilitation in patients with Cerebral Palsy: CPWalker. *Rob Auton Syst* 2017;91:101–14. doi:10.1016/j.robot.2016.12.015.
- [6] Bartenbach V, Gort M, Riener R. Concept and Design of a Modular Lower Limb Exoskeleton. 6th IEEE RAS/EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatronics, 2016, p. 649–54. doi:10.1109/BIOROB.2016.7523699.
- [7] Bayón C, Lerma S, Ramírez O, Serrano JI, Del Castillo MD, Raya R, et al. Locomotor training through a novel robotic platform for gait rehabilitation in pediatric population: short report. *J Neuroeng Rehabil* 2016;13:98. doi:10.1186/s12984-016-0206-x.
- [8] Rüdte S, Moos M, Seppely S, Riener R,

- Marchal-Crespo L. Towards More Efficient Robotic Gait Training: A Novel Controller to Modulate Movement Errors. 6th IEEE RAS/EMBS Int Conf Biomed Robot Biomechatronics 2016:884–9.
- [9] Lefmann S, Russo R, Hillier S. The effectiveness of robotic-assisted gait training for paediatric gait disorders: systematic review. *J Neuroeng Rehabil* 2017;14:1. doi:10.1186/s12984-016-0214-x.
- [10] Wallard L, Dietrich G, Kerlirzin Y, Bredin J. Robotic-assisted gait training improves walking abilities in diplegic children with cerebral palsy. *Eur J Paediatr Neurol* 2017;1–8. doi:10.1016/j.ejpn.2017.01.012.
- [11] World Health Organization. International Classification of Functioning, Disability and Health, children and youth version. World Health Organization; 2007.
- [12] Faigenbaum, Avery D. Kramer, W. Blimkie C. Youth Resistance Training: updated position statement paper from the National Strength and Conditioning Association. *J Strength Con Res* 2009;23:60–79. doi:10.1519/JSC.0b013e31819df407.
- [13] Damiano DL, Abel MF, Di AD, Mf A. Functional outcomes for strenght training in spastic cerebral palsy. *Arch Phys Med Rehabil* 1998;79:119–25.
- [14] Van Asseldonk EHF, Veneman JF, Ekkelenkamp R, Buurke JH, Van Der Helm FCT, Van Der Kooij H. The effects on kinematics and muscle activity of walking in a robotic gait trainer during zero-force control. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2008;16:360–70. doi:10.1109/TNSRE.2008.925074.
- [15] Dewar R, Love S, Johnston LM. Exercise interventions improve postural control in children with cerebral palsy: a systematic review. *Dev Med Child Neurol* 2014. doi:10.1111/dmcn.12660.
- [16] Rehabilitation Measures Database. Timed 10-Meter Walk Test. Timed 10-M Walk Test n.d. www.rehabmeasures.org (accessed August 11, 2016).
- [17] Crapo RO, Casaburi R, Coates AL, Enright PL, MacIntyre NR, McKay RT, et al. ATS statement: Guidelines for the six-minute walk test. *Am J Respir Crit Care Med* 2002;166:111–7. doi:10.1164/rccm.166/1/111.
- [18] Fowler EG, Staudt LA, Greenberg MB, Oppenheim WL. Selective Control Assessment of the Lower Extremity (SCALE): Development, validation, and interrater reliability of a clinical tool for patients with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol* 2009;51:607–14. doi:10.1111/j.1469-8749.2008.03186.x.
- [19] Russell DJ, Rosenbaum PL, Avery LM, Lane M. Gross motor function measure (GMFM-66 and GMFM-88) user's manual. Press, Cambridge University; 2002.
- [20] Gorton GE, Stout JL, Bagley AM, Bevans K, Novacheck TF, Tucker CA. Gillette Functional Assessment Questionnaire 22-item skill set: Factor and Rasch analyses. *Dev Med Child Neurol* 2011;53:250–5. doi:10.1111/j.1469-8749.2010.03832.x.

PREDICCIÓN DE ACTIVIDADES DE LA VIDA DIARIA EN ENTORNOS INTELIGENTES PARA PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA

A. Bertomeu-Motos, S. Ezquerro, Juan A. Barios, Luis D. Lledó, Francisco J. Badesa, N. Garcia-Aracil
 Universidad Miguel Hernández, Elche (Alicante) 03202,
 abertomeu@umh.es

Resumen

Las Actividades de la Vida Diaria (AVD) son aquellas actividades orientadas al cuidado, productividad y ocio. Las tareas básicas de una persona, que consisten en el cuidado personal, se pueden ver afectadas por una enfermedad degenerativa o el sufrimiento de un accidente cerebrovascular. Por este motivo, el proyecto “Adaptive Multimodal Interfaces to Assist Disabled People in Daily Activities (AIDE)” pretende realizar un sistema multimodal capaz de extraer información relevante del comportamiento e intención del usuario, extraer información de las capacidades motoras residuales y del análisis del entorno con el objetivo de mejorar la independencia de estas personas. Para ello se ha realizado el estudio de dos técnicas de aprendizaje automático: campos aleatorios condicionales (CRF) y redes neuronales temporales (TDNN), para predecir la actividad que el usuario desea realizar estudiando también la adaptación de los métodos a la rutina del usuario. De este modo, y usando un entorno virtual, se ha adquirido la información necesaria de un usuario durante cinco días bajo las condiciones del proyecto AIDE obteniendo una tasa de acierto de más del 90 % en ambos métodos, llegando al 100 % de precisión en algunas actividades usando CRF. Por lo tanto, mediante esta técnica seremos capaces de ayudar a estas personas actuando sobre el hogar, adaptándonos a sus necesidades y rutinas.

Palabras clave: AVD, Movilidad Reducida, Entornos Inteligentes, Predicción, CRF, TDNN.

1. INTRODUCCIÓN

Las Actividades de la Vida Diaria (AVD) se definen como aquellas actividades orientadas al cuidado, productividad y ocio. Estas actividades se pueden dividir en dos grupos: las tareas básicas, consisten en el cuidado personal como pueden ser comer, beber o bañarse; y las tareas instrumentales, aquellas actividades que permiten una vida independiente en una comunidad como preparar comida, hacer la compra o el cuidado de personas [1].

El incremento de las técnicas de aprendizaje automático ha causado un gran interés en el desarrollo de entornos inteligentes de asistencia con funciones muy importantes como pueden ser la monitorización e intervención remota en ámbitos relacionados con el cuidado y la salud. En la literatura podemos encontrar estudios sobre el reconocimiento de actividades mediante entornos inteligentes, mediante técnicas de visión por computador a través de cámaras en primera persona o también realizando combinaciones entre cámaras y sensores de radiofrecuencia (RFID). Estas técnicas se centran en la ayuda de ancianos o personas con demencia [2][3][4][5].

Por otro lado, existen casas inteligentes con sensores embebidos capaces de generar información útil mientras un residente realiza su rutina diaria [6][7]. A partir de esta información, se pueden realizar técnicas de aprendizaje automático para predecir la actividad que el usuario está realizando aplicando modelos de aprendizaje que tengan en cuenta la información temporal de los datos. Estos modelos pueden ser modelos ocultos de Markov (HMM), campos aleatorios condicionales (CRF) o redes neuronales temporales (TDNN) entre otras [8][9].

En este trabajo se van a realizar técnicas de aprendizaje automático mediante dos modelos de predicción: CRF y TDNN. Estos modelos se estudiarán bajo las condiciones descritas en el proyecto “Adaptive Multimodal Interfaces to Assist Disabled People in Daily Activities (AIDE)” para realizar una predicción sobre la intención del usuario. Este proyecto pretende crear un sistema multimodal capaz de extraer información relevante de las capacidades motoras residuales, comportamiento e intención del usuario, del análisis del entorno y de factores de contexto para ayudar a personas con movilidad reducida que hayan sufrido algún daño cerebral o que tengan alguna enfermedad degenerativa. A través de una plataforma de simulación seremos capaces de obtener la localización del sujeto, los objetos con los que interactúa, la luminosidad de la estancia, la temperatura y la actividad que se está realizando necesarias para el entrenamiento de los modelos seleccionados.

Tabla 1: Tabla que relaciona las 10 actividades que se pueden realizar con los objetos a interactuar en cada una de ellas. Además, se muestran los objetos mínimos necesarios para realizar una correcta tarea.

ID	Actividad	Objeto	Objetos mínimos
1	Comer	Plato, tenedor, cuchillo, nevera, microondas	Plato y cuchillo
2	Beber	Vaso, botella, nevera	Vaso
3	Temperatura	Control de temperatura	Control de temperatura
4	Interacción con la TV	Televisión, mando a distancia	Mando a distancia
5	Entretenimiento	equipo de música, libros	Libros ó equipo de música
6	Persianas	Ventana	Ventana
7	Enchufar/apagar la luz	Interruptor	Interruptor
8	Lavarse los dientes	Cepillo de dientes, grifo	Cepillo de dientes
9	Lavarse la cara	Toalla, grifo	Toalla
10	Nada	-	-

2. ENTORNO VIRTUAL

Los datos necesarios para entrenar los modelos seleccionados se obtienen mediante una plataforma virtual capaz de simular la una rutina diaria controlada. Este entorno virtual se ha realizado dentro del proyecto AIDE, la Figura 1 muestra un frame del entorno virtual mientras se está realizando la tarea de comer. Como se puede observar, aparece un reloj que simula la hora del día en la que nos encontramos, avanzando a razón de un minuto por segundo. También realiza una detección automática de la localización del usuario dentro de la casa y del objeto que está observando. La actividad que se realiza se selecciona manualmente.

Además de esta información necesitamos conocer la luminosidad de la habitación y si el control de temperatura ha sido conectado o no. Esta informa-

ción se obtiene a posteriori analizando los objetos con los que ha interactuado el usuario, obteniendo, de esta manera, la evolución de los dos parámetros a lo largo de la simulación. Las actividades, definidas en el proyecto, que se pueden realizar en cada estancia son

- Habitación: Enchufar/apagar la luz, levantarse, acostarse, subir/bajar persianas, interacción con la cama.
- Salón: Enchufar/apagar la luz, interacción con la televisión, interacción con el equipo de música, subir/bajar persianas, activar/desactivar temperatura.
- Baño: Enchufar/apagar la luz, lavarse la cara, lavarse los dientes.
- Cocina: Enchufar/apagar la luz, beber, comer, abrir/cerrar nevera, abrir/cerrar microondas.

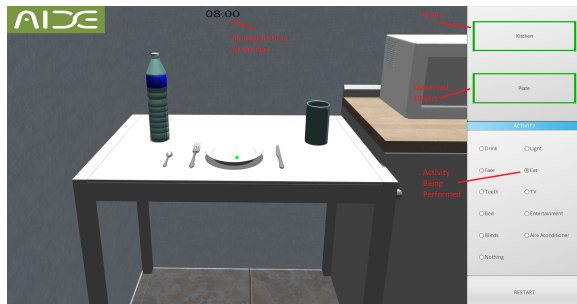


Figura 1: Frame del entorno virtual mientras se realiza la actividad de comer.

En el entorno simulado se han simplificado las actividades para que resulte mas fácil su uso simplificando el entorno virtual. Nos referiremos a las actividades ‘abrir/cerrar nevera’ y ‘abrir/cerrar microondas’ se asumen dentro las actividades de *comer* y *beber* y se ha creado una actividad llamada *entretenimiento* a las actividades que se pueden realizar en el *salón* que no sean la interacción con la TV. Las actividades ‘levantarse’, ‘acostarse’, ‘interacción con la cama’ han sido eliminadas. En la Tabla 1 se reflejan los objetos mínimos con los que

Acquisition Time	Simulated Time	Room	Observed Object	Performed Task
20:45:04:	08:35	Kitchen	Table	Eat
20:45:05:	08:36	Kitchen	Table	Eat
20:45:06:	08:37	Kitchen	Plate	Eat
20:45:07:	08:38	Kitchen	Plate	Eat
20:45:08:	08:39	Kitchen	Plate	Eat
20:45:09:	08:40	Kitchen	Plate	Eat
20:45:10:	08:41	Kitchen	Plate	Eat
20:45:11:	08:42	Kitchen	Fork	Eat
20:45:12:	08:43	Kitchen	Fork	Eat
20:45:13:	08:44	Kitchen	Plate	Eat
20:45:14:	08:46	Kitchen	Plate	Eat
20:45:16:	08:47	Kitchen	Plate	Eat
20:45:17:	08:48	Kitchen	Knife	Eat
20:45:18:	08:49	Kitchen	Knife	Eat
20:45:19:	08:50	Kitchen	Table	Eat
20:45:20:	08:51	Kitchen	Table	Eat
20:45:21:	08:52	Kitchen	Bottle	Drink
20:45:22:	08:53	Kitchen	Bottle	Drink
20:45:23:	08:54	Kitchen	Bottle	Drink
20:45:24:	08:55	Kitchen	Bottle	Drink
20:45:25:	08:56	Kitchen	Bottle	Drink
20:45:26:	08:57	Kitchen	Wall	Drink
20:45:27:	08:58	Kitchen	Wall	Drink
20:45:28:	08:59	Kitchen	Glass	Drink
20:45:29:	09:00	Kitchen	Glass	Drink
20:45:30:	09:01	Kitchen	Glass	Drink
20:45:31:	09:02	Kitchen	Glass	Drink

Figura 2: Muestra de captura de datos.

se debe interactuar para realizar una actividad de manera correcta.

Mediante la Tabla 1 un usuario puede simular actividades que realizaría en su día a día y el sistema es capaz de almacenar esa información para después ser usada para entrenar el modelo de predicción deseado (ver Figura 2). Por lo tanto, este entorno de simulación es capaz de capturar cuatro variables de entrada: e, objeto, temperatura y luminosidad; y una variable de salida: actividad.

3. MODELOS DE PREDICCIÓN

Para el reconocimiento de las actividades que un usuario realiza y adaptarnos a su rutina diaria se necesitan modelos de aprendizaje automático que tenga en cuenta la información temporal de los datos que se han generado. Estos modelos se basan en el aprendizaje supervisado ya que, para un conjunto de datos de entrada, se conoce la clase a la que pertenece. Por lo tanto, se han elegido dos modelos de aprendizaje: CRF y TDNN.

Los CRF son un modelo probabilístico muy utilizado para segmentación y clasificación de datos[10]. Este modelo discriminativo tiene en cuenta no solo el estado actual sino que también utiliza los estados previos para realizar la predicción. Un modelo condicional calcula las probabilidades de una posible secuencia clasificada dada un conjunto de observaciones evitando así la restricción de independencia que asumen los modelos generativos como pueden ser los HMM[11].

Por otro lado, los TDNN son unas redes neuronales que trabajan sobre datos secuenciales. Esos operan, como otras redes neuronales, mediante múltiples capas de conexiones implementadas como una red neuronal *feedforward* en vez de como una red neuronal recurrente [12]. La principal ca-

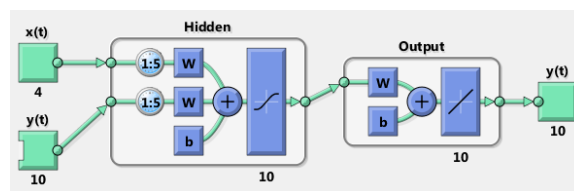


Figura 3: Estructura del TDNN con un tamaño de capa oculta de 10 y un retardo de 5 muestras.

racterística de este tipo de redes es la habilidad de expresar la relación entre las entradas de una secuencia temporal. Se van a usar las redes denominadas *Nonlinear Autoregressive with Exogenous input (NARX)*, una red de arquitectura dinámica [13]. La estructura del TDNN se puede observar en la Figura 3, donde se ha seleccionado un tamaño de capa oculta de 10 y un retardo de 5.

4. PRECISIÓN DE LOS MODELOS

Para probar los modelos seleccionados se ha usado el entorno virtual para generar datos. Estos datos representan a un usuario realizando actividades durante cinco días, 16 horas de actividad y 8 horas de descanso nocturno, intentando seguir la misma rutina todos los días. No había ningún requisito específico en el orden de interacción con los objetos a la hora de realizar una actividad específica. Por otro lado, los datos de entrada y salida de nuestro sistema se han clasificado en 5 estancias; un total de 24 objetos; temperatura activada o desactivada; luminosidad natural, artificial o sin luz; y un total de 10 tareas. En la Figura 4 se muestra la media de cada actividad con respecto a los cinco días y su desviación.

Como se pretende observar el comportamiento de los modelos con respecto a la rutina, se han realizado cuatro casos:

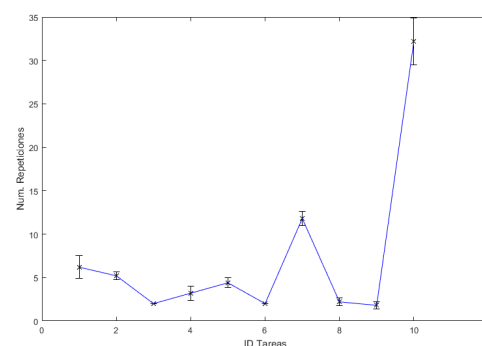


Figura 4: Media y desviación típica de las tareas con respecto a los 5 días.

Output Class	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
	110 11.4%	2 0.2%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 0.1%	0 0.0%	0 0.0%	6 0.6%	92.4% 7.6%
	3 0.3%	85 8.8%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	2 0.2%	94.4% 5.6%	
	0 0.0%	0 0.0%	6 0.6%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 0.1%	85.7% 14.3%	
	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	148 15.4%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	4 0.4%	97.4% 2.6%	
	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	132 13.7%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	4 0.4%	97.1% 2.9%	
	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	5 0.5%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	2 0.2%	71.4% 28.6%	
	1 0.1%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	31 3.2%	0 0.0%	0 0.0%	6 0.6%	81.6% 18.4%	
	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	39 4.1%	0 0.0%	3 0.3%	92.9% 7.1%	
	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 0.1%	22 2.3%	1 0.1%	91.7% 8.3%	
3 0.3%	3 0.3%	2 0.2%	4 0.4%	4 0.4%	2 0.2%	13 1.4%	2 0.2%	2 0.2%	311 32.4%	89.9% 10.1%		
	94.0% 6.0%	94.4% 5.6%	75.0% 25.0%	97.4% 2.6%	97.1% 2.9%	71.4% 28.6%	68.9% 31.1%	92.9% 7.1%	91.7% 8.3%	91.5% 8.5%	92.5% 7.5%	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		

(a) TDNN

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	117 12.2%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
2	0 0.0%	90 9.4%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
3	0 0.0%	0 0.0%	8 0.8%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	152 15.8%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
5	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	136 14.2%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
6	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	4 0.4%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	8 0.8%	33.3% 66.7%
7	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	32 3.3%	0 0.0%	0 0.0%	29 3.0%	52.5% 47.5%
8	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	36 3.8%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
9	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	6 0.6%	24 2.5%	0 0.0%	80.0% 20.0%
10	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	3 0.3%	13 1.4%	0 0.0%	0 0.0%	302 31.5%	95.0% 5.0%
	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	57.1% 42.9%	71.1% 28.9%	85.7% 14.3%	100% 0.0%	89.1% 10.9%	93.9% 6.1%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	

(b) CRF

Figura 5: Matriz de confusión obtenida con los datos de test para los modelos en el caso 4vs1.

1. Un día para entrenamiento del modelo y un día para test del modelo (1vs1).
2. Dos días para entrenamiento del modelo y un día para test del modelo (2vs1).
3. Tres días para entrenamiento del modelo y un día para test del modelo (3vs1).
4. Cuatro días para entrenamiento del modelo y un día para test del modelo (4vs1).

La salida del TDNN se ha modificado de manera que sea un vector de dimensión 10 donde la salida correspondiente vale 1 y 0 en el resto de los casos. Los resultados de los distintos métodos implementados se muestra en la Tabla 2.

Se puede observar que el TDNN tiene una buena precisión mayor al 90 % desde el primer día, sin embargo, el CRF es más susceptible a cambios en la realización de las tareas, variando su precisión a lo largo de los días. Sin embargo, el mayor porcentaje de acierto se obtiene en el caso 4vs1 mediante el CRF. En la Figura 5 se muestran dos matrices de confusión para el caso 4vs1 obtenida a partir de los datos de test para cada uno de los modelos.

Mediante la Figura 5 podemos ver fácilmente la

debilidad de estos algoritmos. Podemos ver que las tareas de (1)comer y (1)beber, al ser muy parecidas, el TDNN comete un pequeño error mientras que el CRF no. Por otro lado, se puede observar que la tarea (7)Enchufar/apagar la luz se confunde fácilmente con la tarea (10)Nada en ambos casos, esto puede ser debido a que esta actividad puede ocurrir en cualquier estancia y en cualquier momento del día y, además, la única diferencia con respecto a la tarea (10) es la interacción con el interruptor. En ambos modelos, se puede observar que la predicción de las actividades que menos se realizan, como puede ser la que actividad (3)Temperatura, el TDNN tiene menor tasa de acierto que el CRF. Cabe añadir que, aunque la diferencia de precisión entre ambos métodos es pequeña, el CRF llega a tener un porcentaje de acierto del 100 % en varias de las actividades mientras que el TDNN no.

5. CONCLUSIÓN

Este trabajo presenta una comparación de dos técnicas de aprendizaje automático con el objetivo de reconocer actividades de la vida diaria bajo las condiciones del proyecto AIDE. Los métodos que se han usado, CRF y TDNN, se basan en aprovechar la información temporal de los datos para obtener un mejor resultado. Se ha observado que ambos métodos tienen una gran tasa de acierto, por encima del 90 % cuando se entrenan con cuatro días y se testea con un día. Sin embargo, el TDNN se adapta mejor a la rutina del usuario desde el primer día. Cabe destacar que,

Tabla 2: Precisión de los modelos en cada caso.

Modelo	1vs1	2vs1	3vs1	4vs1
TDNN	92,6 %	93,1 %	93,1 %	92,5 %
CRF	84,5 %	92,3 %	86 %	93,9 %

aunque ambos modelos tengan una gran porcentaje de acierto, solamente el CRF llega a tener un 100 % de acierto en algunas actividades mientras que el TDNN solo alcanza un 97,4 % como máximo en la actividad (4) *Interacción con la TV*. Esto indica que el CRF es capaz de determinar con exactitud algunas actividades sin ninguna confusión y el TDNN tiene siempre un pequeño error de detección.

A partir de este trabajo podemos destacar que ambos métodos son muy buenos con respecto a la predicción de AVD en un entorno inteligente que sea capaz de extraer información sobre el comportamiento e intención del usuario, del análisis del entorno y de factores de contexto. De este modo, podremos ser capaces de ayudar a personas con movilidad reducida o con enfermedades degenerativas actuando sobre el hogar adaptándonos a las necesidades y rutinas de cada persona.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Comisión Europea a través del proyecto AIDE: Adaptive Multimodal Interfaces to Assist Disabled People in Daily Activities (Grant agreement no: 645322) y por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto DPI2015-70415-C2-2-R.

Referencias

- [1] M. Law, "Evaluating activities of daily living: directions for the future," *American Journal of Occupational Therapy*, vol. 47, no. 3, pp. 233–237, 1993.
- [2] H. Pirsiavash and D. Ramanan, "Detecting activities of daily living in first-person camera views," in *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012 IEEE Conference on*. IEEE, 2012, pp. 2847–2854.
- [3] S. Park and H. Kautz, "Hierarchical recognition of activities of daily living using multi-scale, multi-perspective vision and rfid," in *Intelligent Environments, 2008 IET 4th International Conference on*. IET, 2008, pp. 1–4.
- [4] M. Ghorbel, F. Arab, and M. Mokhtari, "Assistive housing: case study in a residence for elderly people," in *Pervasive Computing Technologies for Healthcare, 2008. PervasiveHealth 2008. Second International Conference on*. IEEE, 2008, pp. 140–143.
- [5] A. Lotfi, C. Langensiepen, S. M. Mahmoud, and M. J. Akhlaghinia, "Smart homes for the elderly dementia sufferers: identification and prediction of abnormal behaviour," *Journal of ambient intelligence and humanized computing*, vol. 3, no. 3, pp. 205–218, 2012.
- [6] D. J. Cook, A. S. Crandall, B. L. Thomas, and N. C. Krishnan, "Casas: A smart home in a box," *Computer*, vol. 46, no. 7, pp. 62–69, 2013.
- [7] T. L. Kasteren, G. Englebienne, and B. J. Kröse, "Human activity recognition from wireless sensor network data: Benchmark and software," *Activity recognition in pervasive intelligent environments*, pp. 165–186, 2011.
- [8] H. Alemdar, C. Tunca, and C. Ersoy, "Daily life behaviour monitoring for health assessment using machine learning: bridging the gap between domains," *Personal and Ubiquitous Computing*, vol. 19, no. 2, pp. 303–315, 2015.
- [9] S. T. M. Bourobou and Y. Yoo, "User activity recognition in smart homes using pattern clustering applied to temporal ann algorithm," *Sensors*, vol. 15, no. 5, pp. 11 953–11 971, 2015.
- [10] J. Lafferty, A. McCallum, F. Pereira *et al.*, "Conditional random fields: Probabilistic models for segmenting and labeling sequence data," in *Proceedings of the eighteenth international conference on machine learning, ICML*, vol. 1, 2001, pp. 282–289.
- [11] L. Rabiner and B. Juang, "An introduction to hidden markov models," *ieee assp magazine*, vol. 3, no. 1, pp. 4–16, 1986.
- [12] V. Peddinti, D. Povey, and S. Khudanpur, "A time delay neural network architecture for efficient modeling of long temporal contexts." in *INTERSPEECH*, 2015, pp. 3214–3218.
- [13] J. M. P. Menezes and G. A. Barreto, "Long-term time series prediction with the narx network: An empirical evaluation," *Neurocomputing*, vol. 71, no. 16, pp. 3335–3343, 2008.

Sistema de Visión Estereoscópico para el guiado de un Robot Quirúrgico en Operaciones de Cirugía Laparoscópica HALS

Carlos Castedo Hernández*, Rafael Estop Remacha*, Eusebio de la Fuente**, Lidia Santos**

*Escuela Ingenierías Industriales Univ. Valladolid. Paseo Cauce 59. 47005 Valladolid,
email: {carlos.castedo, rafael.estop}@alumnos.uva.es

**ITAP Univ. Valladolid. Paseo Cauce 59. 47005 Valladolid,
email: efuente@eii.uva.es, lidia.santos@uva.es

Resumen

En este artículo se presenta un sistema de visión estereoscópico destinado al guiado de un robot colaborativo en operaciones de cirugía. El objetivo del sistema de visión es que el robot quirúrgico tenga en todo momento localizada la mano del cirujano para no colisionar con ella y para cooperar en la operación si es necesario. El sistema de visión va ubicado en el interior del abdomen del paciente, ya que se ha enfocado a operaciones de cirugía laparoscópica asistida con la mano.

Palabras Clave: Cirugía Mínimamente Invasiva, estereovisión, robótica quirúrgica.

1 INTRODUCCIÓN

A partir de los años noventa, con el enorme desarrollo en la tecnología del video y la transmisión de imágenes, se comienza a desarrollar la cirugía laparoscópica o mínimamente invasiva entre las diferentes especialidades quirúrgicas que comparten el tratamiento del abdomen.

La cirugía laparoscópica es una técnica que usa varias incisiones, llamadas puertos, de 0.5 a 1 cm. En cada puerto se inserta un instrumento tubular conocido como trocar. Durante el procedimiento, a través de los trocates, se pasan instrumentos especializados y una cámara especial llamada laparoscopio. Al iniciar el procedimiento, el abdomen se infla con gas, dióxido de carbono, para proporcionar al cirujano un espacio de trabajo y visibilidad. El laparoscopio transmite imágenes de la cavidad abdominal a los monitores de video de alta resolución del quirófano.

En ciertos casos, el cirujano puede elegir usar un tipo de puerto especial que es lo suficientemente amplio como para insertar una mano. Cuando se usa un puerto para la mano, la técnica quirúrgica se llama laparoscopia asistida con la mano (*HALS Hand Assisted Laparoscopic Surgery*) [5] [11].

Las ventajas de la cirugía laparoscópica son: una mejor visión y abordaje de la cavidad abdominal, disminución del dolor postoperatorio, reducción de la posibilidad de complicaciones infecciosas, acortamiento del tiempo de estancia hospitalaria, mayor rapidez en la reincorporación a la vida social y laboral y mejor resultado estético [7].

A partir del año 2000 aparecen las primeras aplicaciones de la robótica a la cirugía laparoscópica, destinadas a soslayar algunas limitaciones de esta: pérdida de la sensación táctil, limitaciones en la maniobrabilidad, campo visual bidimensional, particularidades del instrumental, complejidad de los procedimientos y necesidad de neumoperitoneo [12].

La calidad de la imagen tridimensional intraoperatoria con sensación de profundidad, la perfecta sincronización manos-ojos, la precisión de los instrumentos, la exactitud de sus suturas y la exéresis que se realiza con mayor destreza y confort, hará probablemente que pronto la cirugía robótica sea ampliamente difundida a pesar de su elevado coste [1].

En la actualidad aparecen nuevos intentos de acceder a la zona quirúrgica con la mínima invasión y han aparecido nuevos conceptos, como la cirugía endoscópica transluminal por orificios naturales (*NOTES, Natural Orifice Translumenal Endoscopic Surgery*), la cirugía laparoscópica a través de incisión única (*SILS, Single Incision Laparoscopic Surgery*) y la cirugía transanal a través de puerto único (*TAMIS, Transanal Minimally Invasive Surgery*) [4].

Existe una tendencia clara a avanzar cada vez más hacia técnicas menos invasivas, intentando lograr una cirugía más segura para el paciente y más cómoda para el cirujano.

1.1 CIRUGÍA HALS

Las técnicas laparoscópicas presentan ciertas limitaciones como:

- Capacidad restringida de manipulación del espécimen enfermo.
- La reducida retroalimentación táctil asociada con un abordaje totalmente laparoscópico.

- La imposibilidad de una visualización completa del campo quirúrgico.
- La larga duración de las operaciones de cirugía laparoscópica.

La cirugía laparoscópica asistida manualmente (HALS), es una técnica algo diferente de la tradicional cirugía laparoscópica. Con HALS, se utiliza un aparato para mantener el neumoperitoneo mientras se inserta la mano del cirujano a través de una pequeña incisión en el abdomen. Como en la cirugía laparoscópica estándar, el cirujano visualiza la zona mediante un monitor, pero además tiene la ventaja que implica el uso de su mano. La mano posee 27 grados de libertad que proporcionan una gran versatilidad para llevar a cabo todo tipo de operaciones. Debido a que la HALS permite el mantenimiento de la sensación táctil y promueve un grado de coordinación mano-ojo, esta variación en la cirugía laparoscópica ha sido más fácil de dominar para los cirujanos entrenados exclusivamente en la cirugía abierta.

Siguiendo el enfoque de la cirugía laparoscópica, el lugar de la mano debe ser considerado como un puerto de la operación y triangulado con el otro puerto de la operación laparoscópica de manera que ambos puertos formen ángulos de azimut iguales con el puerto de visualización laparoscópica. El posicionamiento de los puertos de la operación en ángulos iguales permite al cirujano dirigirse ergonómicamente al órgano objetivo.

Debido a que la tecnología HALS está en sus comienzos, existe la necesidad urgente de desarrollar estudios adecuados para explorar su potencia. Por último, se necesitan nuevos métodos para promover la educación quirúrgica y difundir el conocimiento de las capacidades de la cirugía HALS [2] [8].

2 SISTEMA DE VISION PARA EL GUIADO DEL ROBOT QUIRÚRGICO

Con objeto de robotizar el proceso de cirugía HALS, presentaremos el sistema de visión estereoscópico que tiene por objeto identificar la mano del cirujano en el interior del abdomen. La información obtenida por este sistema se empleará para el guiado de un robot colaborativo que cooperará con el cirujano en aquellas maniobras que este lo requiera.

La obtención de la posición de la mano se llevará a cabo por dos cámaras de pequeño tamaño introducidas en el abdomen del paciente que, a partir de las parejas de imágenes estereoscópicas, permitirán la reconstrucción tridimensional de la mano del cirujano,

evitando así que el robot colisione con esta en su avance.

La identificación de la mano del cirujano dentro de la cavidad abdominal del paciente resulta compleja, debido a la gran cantidad de grados de libertad que esta tiene y a que en muchas situaciones esta aparece parcialmente oculta. Para plantear una solución inicial se ha empleado una identificación empleando el color.

2.1 CORRESPONDENCIA ESTEREOSCOPICA

La correspondencia estereoscópica consiste en la asociación de las proyecciones de un punto de la escena en las imágenes del par estereoscópico.

El proceso de correspondencia es el paso más complejo en la visión estereoscópica. El hecho de tener dos imágenes tomadas desde dos cámaras y desde posiciones o ángulos diferentes hace que la iluminación pueda ser diferente en las imágenes, incluso con la aparición de distintos reflejos. Además, existe la posibilidad de que se produzcan oclusiones quedando ocultas partes de la escena en una imagen y visibles en la otra. Por otro lado, aunque las imágenes sean realizadas con cámaras con las mismas características, el comportamiento de los componentes electrónicos y ópticos puede ser distinto.

Existen varias técnicas de correspondencia estereoscópica que difieren en los elementos identificativos utilizados para llevar a cabo la correspondencia:

- Las **técnicas basadas en área** que utilizan patrones de intensidad en los que engloban a la vecindad de un píxel de una de las imágenes del par estereoscópico y los comparan con los patrones de intensidad correspondientes con un píxel de la otra imagen del par estereoscópico. La principal ventaja de este tipo de técnicas es la creación de mapas de profundidad muy densos, esto se debe a que la correspondencia se realiza píxel a píxel, obteniendo un valor de disparidad para cada uno. También presentan una serie de desventajas como: el uso de la intensidad en cada píxel hace que sean más sensibles a modificaciones en la iluminación, y la posibilidad de obtener falsas correspondencias.
- Las **técnicas basadas en las características** que emplean representaciones simbólicas obtenidas a partir de la imagen de intensidad. Algunas de estas representaciones simbólicas son: los puntos de borde aislados, cadenas de puntos de bordes, regiones delimitadas por bordes. Algunas de las principales ventajas que presentan estas técnicas

son: estabilidad ante cambios en la iluminación, permiten realizar comparaciones entre atributos, mayor rapidez debida al procesamiento de menos puntos. La principal pega es su falta de densidad en los mapas de profundidad.

2.2 CÁLCULO DE LA PROFUNDIDAD

Para la determinación de las distancias a la que se encuentra la mano del cirujano en nuestra escena se ha de realizar la correspondencia entre las imágenes izquierda y derecha. La forma de obtener las distancias está ligada con la geometría del sistema estereoscópico. Debido a la restricción epipolar [6], el cálculo de las distancias es una simple triangulación. Estando las proyecciones de un objeto en la misma posición en el eje vertical.

Las imágenes del par estereoscópico presentan un desplazamiento horizontal que hace que las proyecciones de los objetos de la escena tengan posiciones en el eje horizontal ligeramente distintas. Esta diferencia en el posicionamiento en el eje horizontal es lo que se conoce como disparidad.

Aplicando la semejanza de triángulos para ambas proyecciones, se obtiene los valores de x_I , ecuación 1 y de x_D , ecuación 2. Sabiendo que la diferencia de estos valores se corresponde con la disparidad se obtiene la coordenada z del punto de la escena.

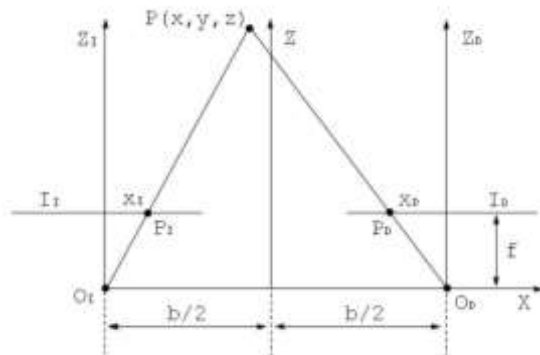


Figura 1 Geometría del estereó

$$x_I = \frac{f}{z} \left(x + \frac{b}{2} \right) \quad (1)$$

$$x_D = \frac{f}{z} \left(x - \frac{b}{2} \right) \quad (2)$$

$$d = x_I - x_D \rightarrow z = \frac{f}{d} b \quad (3)$$

Como se puede observar en la ecuación 3, la distancia es inversamente proporcional a la disparidad, es decir, cuanto más cerca se encuentre un objeto en la escena con mayor disparidad aparecerá en las imágenes.

Como ya se comentó anteriormente dependiendo de la aplicación del sistema estereoscópico se necesitan mapas de profundidad más o menos densos. Dependiendo de la técnica utilizada para la creación del mapa de disparidad será necesario llevar a cabo la interpolación de este.

Tras el cálculo de disparidades cabe la posibilidad de encontrarnos con errores en los mapas de profundidad. Estos se pueden deber a errores en el cálculo de los valores de disparidad. Para solucionar estos problemas se aplican una serie de filtros sobre el mapa de disparidades.

El tratamiento de los mapas de disparidad se realiza basándose en la idea de que un pixel propio de un objeto de la escena tendrá un valor de disparidad parecido al resto de pixeles pertenecientes al objeto. Los filtros más utilizados son el filtro de la mediana y el filtro de la media.

3 IMPLANTACIÓN

Para la programación se ha empleado la biblioteca de procesamiento de imágenes OpenCV [9], que tiene una serie de funciones que permiten la obtención de correspondencias mediante emparejamiento por áreas (*Block Matching* en OpenCV).

3.1 PUESTA EN CORRESPONDENCIA E INTERPOLACIÓN

La implementación de algoritmos basados en áreas en OpenCV se realiza mediante los siguientes pasos:

- Un prefiltrado de la imagen para normalizar o intensificar la intensidad de las imágenes.
- Búsqueda de correspondencias entre ambas imágenes.
- Filtrado de los resultados para eliminar posibles ruidos presentes en el mapa de disparidades.

Todos los algoritmos basados en áreas para obtener las correspondencias estereoscópicas comparan el valor tanto de los píxeles evaluados como el de sus vecindades, el conjunto formado por el pixel y su vecindad es conocido como ventana.

En el **prefiltrado** de las imágenes de entrada se puede llevar a cabo una normalización de las imágenes o la intensificación de los bordes. El normalizado de la imagen se realiza mediante la resta del valor medio de intensidad de los píxeles de su ventana, estableciendo un máximo y un mínimo. Con el normalizado se consigue reducir el ruido presente en las imágenes. La intensificación de los bordes se realiza asignando pesos a los píxeles de una ventana, siendo mayor el peso de los píxeles centrales que el de los extremos, consiguiendo resaltar los bordes de los objetos.

La **búsqueda de correspondencias** en las funciones de OpenCV utilizan la restricción epipolar y buscan la proyección de un píxel en una imagen solo a lo largo de la línea epipolar en la otra. El algoritmo selecciona una ventana en una de las imágenes y realiza el sumatorio de las intensidades de los píxeles en dicha ventana. A continuación, recorre los píxeles de la línea epipolar de la otra imagen, estableciendo ventanas del mismo tamaño y calculando el sumatorio de las intensidades. La correspondencia se establece entre el píxel de la primera imagen y el píxel de la segunda cuyas ventanas tengan la menor diferencia entre los sumatorios de intensidad. El valor almacenado para esa posición se corresponde con el desplazamiento entre ambos píxeles.

En el **postprocesado** se realiza un filtrado de los resultados obtenidos mediante la búsqueda de correspondencias. Este filtrado es necesario para la eliminación de falsos positivos. Estos son debidos a que el algoritmo selecciona el mejor de los resultados, pero se puede dar el caso que todos los resultados obtenidos son malos, y el algoritmo selecciona el menos malo. Otro aspecto que trata el postprocesado son las zonas correspondientes a bordes de objetos y el nivel de textura en las ventanas.

Los diferentes tipos de algoritmos para la obtención de las correspondencias estereoscópicas implementados en una función presente en la biblioteca de OpenCV son:

- *Graph-Cuts*, correspondencia densa global. Los algoritmos de correspondencia globales intentan encontrar similitudes entre intensidades de píxeles a nivel de imagen completa, creando áreas de píxeles con el mismo nivel de similitud. Afectando la correspondencia de un píxel a sus vecinos (Mujika, 2010). Este algoritmo agrupa los píxeles en función de la profundidad y la similitud, tratando de minimizar la función de energía. Permitiendo identificar formas y bordes, y reduciendo los problemas causados por las oclusiones, iluminación y textura. El problema es que esto supone un coste de procesamiento muy alto, inhabilitando el uso de este algoritmo en sistemas en tiempo real.
- *Block Matching*, correspondencia densa local. Este algoritmo busca las correspondencias para cada píxel, estableciendo las disparidades mediante la comparación de las intensidades de los píxeles en las ventanas. La principal ventaja de este algoritmo es su bajo coste computacional, soportando la carga de trabajo de sistemas de visión en tiempo real. Las principales desventajas son dos. La primera de ellas es el resultado obtenido en los bordes de las imágenes. El hecho de que las imágenes estén tomadas desde diferentes posiciones hace que los bordes de los objetos en las imágenes no coincidan. Cuando se

implementan algoritmos de Block Matching se obtienen resultados muy malos debido a las grandes diferencias de intensidad entre las ventanas situadas en estos bordes. Una segunda desventaja es la posibilidad de encontrarse con texturas muy similares, esto impide que el algoritmo encuentre correspondencias para esas zonas.

- *Semi-Global Block Matching*, correspondencia densa híbrida. Este tipo de algoritmos se encuentran situados entre los algoritmos locales y globales. Es decir, intentan obtener unos resultados cercanos a los de los algoritmos globales, pero a un coste computacional tan bajo como en los locales. Este tipo de algoritmo lleva a cabo la correspondencia estereoscópica mediante la minimización de una función de energía de en las ventanas en las que previamente divide la imagen. Respecto a la correspondencia densa local, aumenta el coste computacional del algoritmo, pero mejora significativamente la calidad de los resultados

Comentadas las características principales de cada uno de los algoritmos se ha de elegir uno para implementarse en el sistema de visión estereoscópica en desarrollo. El sistema va a trabajar en tiempo real, esto obliga a desechar la utilización del algoritmo *Graph-Cuts*.

El algoritmo de correspondencia densa local, *Block Matching*, esta implementado en OpenCV por la función *stereoBM*. Esta función presenta una serie de parámetros de entrada que permiten modificar el proceso de obtención de correspondencias estereoscópicas, alterando el mapa de disparidad que muestra la función como resultado de su ejecución.



Figura 2. Imagen original. Corresponde a la imagen capturada por una de las cámaras del sistema de visión estereoscópico. La mano aparece cubierta por un guante sensorizado que proporcionará datos sobre la flexión y movimiento de los dedos.



Figura 3. Mapa de disparidad obtenido para el par correspondiente a la imagen de la figura 1. Las zonas más claras indican una mayor proximidad a la cámara.



Figura 4. Imagen en la que mediante un filtro de color, se han eliminado todos aquellos elementos que no correspondan a los dedos. Esto permite disminuir significativamente el número de elementos en la nube de puntos y trabajar con componentes conexas que aproximaremos a cilindros.

3.2 PROCESAMIENTO DE LA NUBE DE PUNTOS

Con el mapa de profundidades obtenido ya se puede establecer de forma muy aproximada dónde se ubica la mano del cirujano dentro del abdomen. Esta información es suficiente para evitar la colisión del robot quirúrgico con la mano. No obstante, para lograr que el robot asista al cirujano en su quehacer es preciso procesar el mapa de profundidades para extraer las componentes conexas que corresponden a cada dedo. Más concretamente, será preciso identificar las puntas de estos ya que será ahí donde se llevará a cabo la cooperación.

Para ello, partiendo de la matriz de datos que contiene las coordenadas XYZ de los puntos pertenecientes a los dedos del cirujano convertiremos esta información a un formato en el cual podamos trabajar

eficientemente en espacio tridimensional. Para conseguir esto se van a utilizar las librerías *Point Cloud Library (PCL)* [10], un software libre destinado a la obtención y tratamiento de nubes de puntos en el espacio.

Antes de continuar, es importante analizar qué tipo de nube de puntos vamos a utilizar para almacenar la información. PCL dispone de varios tipos haciendo distinción principalmente en el tipo de punto que la nube va a almacenar. Se puede hacer uso de puntos XY los cuales solo tienen 2 coordenadas en el espacio, de puntos XYZ que tienen 3, los XYZI tienen, a parte de las tres dimensiones, un parámetro más que hace referencia a la intensidad pudiendo así crear una nube de puntos en escala de grises. También están los puntos XYZRGB que al igual que los anteriores ubican puntos en el espacio tridimensional pero además con información cromática.

Dado que en el proceso para conseguir el estéreo se ha convertido la imagen a escala de grises y que más tarde la función que nos proporcionaba las coordenadas de los puntos de la imagen no nos da la información del color, lo más oportuno es utilizar un tipo de punto XYZ. Esto, además, resulta lógico ya que como veremos más adelante el uso del color en la nube de puntos no va a ser necesario para el proceso planteado. Añadirlo solo provocaría un aumento del uso de memoria y tiempo de ejecución.

Una vez completado el volcado de la información a una nube de puntos en PCL las librerías de OpenCV ya no serán necesarias y podremos trabajar libremente con la librería PCL. El resultado de la conversión se puede ver en la Figura 5.

3.3 SEGMENTACIÓN POR CILINDROS

Ahora que se tiene una nube de puntos en el formato deseado podemos proceder a la búsqueda de cilindros en ésta con objeto de obtener cada dedo por separado.

La búsqueda se realiza mediante la función de PCL *sac_segmentation* la cual se basa en la segmentación de una nube de puntos a partir de un modelo dado.

Para un correcto funcionamiento de esta función debemos indicarle diferentes parámetros, comenzando con la nube de puntos de entrada y de salida, éstas pueden ser la misma o no. Además, la función necesita que se le indiquen los valores de las normales a cada punto, es decir, debemos obtener previamente la dirección normal de cada punto de la nube. Este proceso se realiza mediante la función *ExtractIndices*.

Otro dato que debemos introducir es el algoritmo de búsqueda que debe utilizar la función. De entre todas las opciones destaca el método de RANSAC [3].

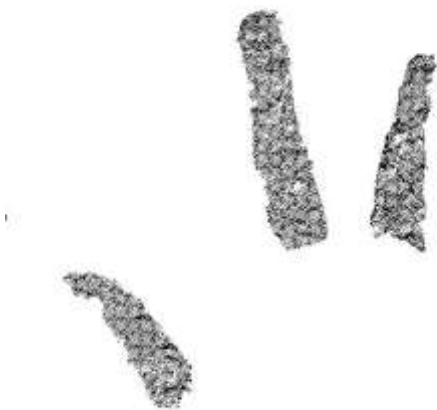


Figura 5. Nube de puntos correspondientes a los tres dedos

Continuamos indicando el modelo que deseamos buscar en nuestra nube de puntos. Estos modelos están predefinidos en PCL y tenemos diversas opciones. Entre ellas hay planos, círculos, esferas o cilindros. Dependiendo del tipo de modelo que se escoja, después se deberá indicar unos parámetros u otros para definir las características del mismo. Si por ejemplo escogemos un plano no tendremos que definir más parámetros. En el caso de un cilindro tendremos que indicar un rango en el cual puede estar el diámetro del mismo.

Por último, se debe indicar a la función valores como el número máximo de iteraciones en la búsqueda, la tolerancia para considerar que un punto forma parte o no del modelo o el peso que tendrá el valor de las normales.

Una vez se han definido correctamente todos estos valores la función puede ejecutarse dándole 2 matrices de datos. En la primera se indicarán los puntos de la nube que conforman el modelo encontrado en caso de que lo hubiera. En la segunda se guardarán los parámetros del modelo encontrado, es decir que en función del tipo de modelo que haya buscado, nos devolverá los parámetros que definen a ese modelo. Para el caso del plano devuelve 4 valores que corresponden a los cuatro parámetros de la ecuación 4:

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (4)$$

Para el caso del cilindro se necesitan 7 parámetros: los 3 primeros dan las coordenadas XYZ de un punto en el espacio, los 3 siguientes aportan la dirección de la recta que pasa por dicho punto y que será el eje del

cilindro, por último, el séptimo valor nos proporciona el radio del cilindro.

En el caso particular de nuestra aplicación, disponemos de una nube de puntos que representa tres dedos de una mano, por lo tanto, si queremos separar dichos dedos para estudiarlos uno por uno tendremos que hacer la búsqueda de cilindros tres veces consecutivas para encontrar cada uno de los dedos. Es importante que tras cada búsqueda se eliminen de la nube original aquellos puntos que ya han sido considerados como pertenecientes a un dedo. Si no se eliminan, todas las búsquedas encontrarán siempre el mismo dedo, aquel que mejor se aproxime a un cilindro o, empleando la nomenclatura de RANSAC, el dedo que más consenso presente.

Por lo tanto, el proceso consiste en realizar la búsqueda, extraer aquellos puntos que pertenezcan al cilindro encontrado y volcarlos en una nueva nube de puntos. Además de almacenar los 7 parámetros que definen a cada cilindro para poder después encontrar fácilmente cada dedo. El resultado obtenido tras este proceso se puede visualizar en la Figura 6.

3.4 DETECCIÓN DE LOS EXTREMOS DE LOS DEDOS

Para identificar la posición de las puntas de los dedos existen diversas opciones, pero todas ellas han de enfrentarse al mismo problema, determinar en la nube de puntos segmentadas por cilindros qué extremo corresponde a la falange distal del dedo y cuál a la proximal.

Este problema existe debido a que se han cogido únicamente los puntos pertenecientes a los dedos, eliminando así los del resto de la mano. De este modo, perdemos la información de dónde está la mano y por lo tanto su orientación.

Para solucionar este problema, se ha recurrido a asumir que la orientación de la mano solo puede estar entre unos determinados valores. Esta suposición puede parecer muy restrictiva pero dado que en nuestra aplicación real el cirujano deberá introducir su mano por un puerto en el abdomen del paciente, la movilidad que tendrá esta será limitada y por tanto esta suposición resulta perfectamente válida.

Asumida esta premisa, el determinar la punta de los dedos se reduce a encontrar el punto más alejado dentro de la nube de puntos correspondiente a cada dedo. Para ello se analiza la coordenada Y de cada punto para después almacenar la memoria el de mayor valor. Este sistema de detección resulta realmente rápido y eficaz. Se puede ver el resultado de la operación en la Figura 7.

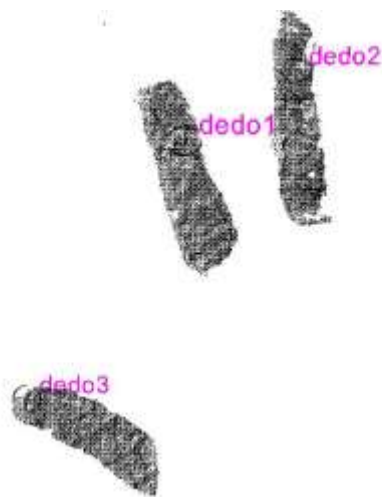


Figura 6. Cada componente conexas correspondiente a un dedo se ha aproximado por un cilindro.

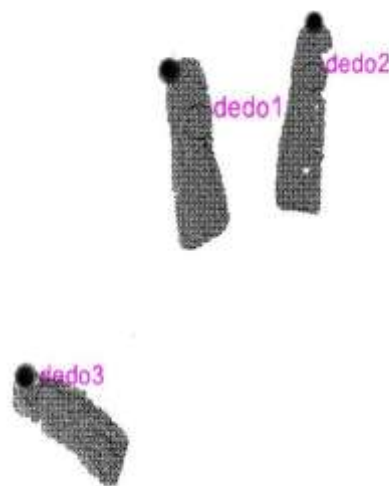


Figura 7. El círculo representado en cada dedo indica cuál es el extremo del dedo.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos sobre esta primera versión de la aplicación tanto en el emparejamiento, Figura 3, como la obtención de primitivas 3D/cilindros Figura 7 son satisfactorios.

El algoritmo ha sido probado en un ordenador con unas prestaciones medias. Se ha podido realizar el procesamiento estéreo de imágenes con resolución 640x480 estéreo a 5 y 6 frames por segundo. Este procesamiento permite obtener el mapa de profundidades válido para la evitación de colisiones por parte del robot quirúrgico. Sin embargo, el procesamiento de la nube de puntos para establecer la posición y orientación de cada dedo, necesario para la cooperación del robot con el cirujano, tarda alrededor de 1 s. Este tiempo es muy elevado para un funcionamiento en una aplicación real. En la actualidad se está trabajando en la reducción de este tiempo de ejecución disminuyendo la resolución de la nube de puntos y paralelizando el procesamiento estéreo con el de la nube.

En cuanto a la precisión lograda en el mapa de profundidad, los errores relativos obtenidos en el cálculo de las distancias nunca han sido superiores a un 2% y son por tanto perfectamente admisibles para el guiado del robot quirúrgico.

5 CONCLUSIONES

El sistema de visión que se presenta en este artículo se encuentra enmarcado dentro de un proyecto de creación de una plataforma robotizada capaz de reconocer y predecir los pasos quirúrgicos y la anatomía específica del paciente para colaborar de forma automática con el cirujano.

En este artículo se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo del sistema de visión para el guiado de este robot quirúrgico. Los resultados muestran la viabilidad del sistema diseñado para el guiado automático del robot, siendo posible su implantación en tiempo real. La identificación de los dedos del cirujano, objetivo necesario para la cooperación del robot con este, requiere de un procesamiento computacionalmente más costoso y en el que debe avanzarse más para que sus tiempos de ejecución sean acordes a los que requiere la plataforma robotizada.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, a través del proyecto: "Sensorized HALS. Entorno sensorizado para cirugía laparoscópica asistida por la mano". Subproyecto dentro del proyecto coordinado "Sistema robotizado colaborativo para cirugía laparoscópica asistida por la mano". DPI2013-47196-C3-3-R.

Referencias

- [1] Amodeo, A. y Linares, A., 2009. Robotic laparoscopic surgery: cost and training. *Minerva Urol Nefrol.*, 61(2), pp. 121.
- [2] Ding J., Xia Y., Liao G., Z. Zhang, S. Liu, Y. Zhang, and Z. Yan, "Hand-assisted laparoscopic surgery versus open surgery for colorectal disease: a systematic review and meta-analysis," *The American Journal of Surgery*, vol. 207, no. 1, pp. 109–119, 2014.
- [3] Fisher, M. A. y Bolles, R. C. "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," *Communications of the ACM*, vol. 24, nº6, pp. 381-395, 1981.

- [4] Flora, E., Wilson, T.G. y Martin, I.J., 2008. A review of natural orifice transluminal endoscopic surgery (NOTES) for intraabdominal surgery: experimental models, techniques and applicability to the clinical setting. *Annals of surgery*, 247, pp. 583-602.
- [5] Gorey, T.F., Tierney, S., Buckley, D., O'Riordain, M., Fitzpatrick, J.M., "Video-assisted Nissen's fundoplication using a hand-access port", *Minimally Invasive Therapy and Allied Technologies*, 5 (4), pp. 364-366, 1996.
- [6] Hartley, R. and Zisserman, A. Multiple View Geometry in Computer Vision. Second Edition. Cambridge University Press, March 2004.
- [7] Iturralde, A.R., González, T. y Castillo, M., 2010. Capítulo II. Principales acontecimientos históricos de la cirugía urológica. En: M. Frank y W. Castro López, eds. *Cirugía Urológica de mínimo acceso*. pp. 54.
- [8] Leraas H., Ong C.T., Sun Z., Adam M.A, Kim J., Gilmore B.F, Ezekian B., Nag U.S., Mantyh C.R., Migaly J. "Hand-Assisted Laparoscopic Colectomy Improves Perioperative Outcomes Without Increasing Operative Time Compared to the Open Approach: a National Analysis of 8791 Patients", *J Gastrointest Surg*;21(4):684-69, April 2017
- [9] "OpenCV" Available: <http://opencv.org/>.
- [10] "Point Cloud Library" Available: <http://pointclouds.org/>.
- [11] Targarona, E.M., Gracia, E., Garriga, J., Martínez-Bru, C., Cortés, M., Boluda, R., Lerma, L., Trías, M., "Prospective randomized trial comparing conventional laparoscopic colectomy with hand-assisted laparoscopic colectomy: Applicability, immediate clinical outcome, inflammatory response, and cost", *Surgical Endoscopy and Other Interventional Techniques*, 16:2, 2002, pp. 234-239, 2002.
- [12] Yoshino, I., Hashizume, M. y Shimada, M., 2001. Thoracoscopic thymectomy with the Da Vinci computer-enhanced surgical system. *Journal of Thoracic & Cardiovascular Surgery*, 122(4), pp. 783-785.

Head movement assessment of cerebral palsy users with severe motor disorders when they control a computer thought eye movements

A. Clemotte, M.A. Velasco, E. Rocon
erocon@csic.es

CAR UPM-CSIC, Ctra. Campo Real, km 0.2, 28500, Arganda del Rey, Spain

Abstract

Eye tracking is currently a promising technology to access computers for people who suffer severe motor disorders, like cerebral palsy. However, there is a lack of usability assessment procedures and concrete value to describe the user's motor capabilities in this specific scenario of computer control. This paper presents a methodology, based on two head movement assessment metrics and the ISO-9241, for the quantitative motor description of users with severe motor disorders, when they control the computer thought their eyes. Seven participants with CP and three people without motor disabilities were recruited for the evaluation of the proposed procedure. Results evidence for the first time how users with CP control their head while they access a computer with their eyes.

Keywords: Usability, Motor impairments, Cerebral palsy, Pointing task, Inertial sensors, Eye tracking.

1 INTRODUCTION

"Cerebral palsy (CP) describes a group of disorders of the development of movement and posture, causing activity limitation, which are attributed to non-progressive disturbances that occurred in the developing fetal or infant brain. The motor disorders of cerebral palsy are often accompanied by disturbances of sensation, cognition, communication, perception, and/or behaviour, and/or by a seizure disorder" [1]. CP limits motor and postural control, which reduce their abilities to control the computers through commonly used interfaces: mouse, keyboard or touchscreen.

There are studies aimed at developing innovative alternative interfaces in response to the special needs of people with motor disorders. An alternative interface is an input interface which can be connected to electronic devices (computers, tablets, smart phones) allowing users to input data using physical gestures (pointing, clicking or dragging) or by other alternative commands (voice, evoking potential motor cortex, etc.) for voluntary actions.

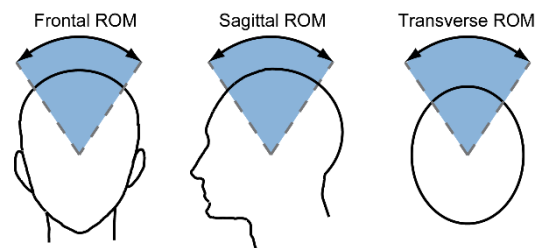


Figure 1. The abnormal movements and postures can be identified by measuring the Range of Motion (ROM) of the head, in the three orthogonal planes.

There are also software applications which provide support to these interfaces, decreasing the effects of certain involuntary movements, through clicking alternative techniques [2], filter techniques [3][4] among others.

Eye tracking systems are widely used by people with cerebral palsy in Spain, especially by the ASPACE Confederation, which groups almost 18000 people with cerebral palsy. However, some users with CP cannot control this interface, possibly due to their low cervical control capabilities.

This paper aims to propose a procedure to measure the head motor characteristics of people with CP with severe motor disorders when they control the computer thought an eye tracking system. The assessment methodology is based in two metrics: head range of movement and head peak frequency, in the three anatomical planes of the head: frontal, sagittal, and transversal. The overall process was evaluated with the ISO 9241 standard, in order to produce rigorous and comparable results. In addition, we evaluated the methodology and leave precedent of the motor characteristics of users severely affected by the PC.

We expect these measures to be able to serve as guidelines to establish design requirements for new developments around the eye-trackers, specially designed for people with cerebral palsy with severe motor disorders.

2 MOTOR ASSESSMENT METRICS

2.1 HEAD RANGE OF MOTION (ROM)

The abnormal movements and postures can be identified by measuring spatial variables, such as the head range of motion. Cervical movements are clinically described as rotations around three orthogonal axes which can be defined mathematically by Euler formulation, which defines rotation on three axes: frontal, sagittal and transverse. The ROM is defined as the difference between maximum and minimum values of the Euler angles. A graphical representation of the ROM in the frontal, sagittal, and transverse planes is shown in Figure 1.

2.2 HEAD PEAK FREQUENCY (HPF)

An analysis in the frequency domain of the head movement was also performed. This analysis is necessary because the motor alterations may vary in frequency. For our analysis, we calculated the frequency at which there is the greatest spectral density of the head movement in all three axes of rotation.

2.3 ISO 9241

The ISO 9241-9 “Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) - Part 9: Requirements for non-keyboard input devices” [5] provides guidelines and assessment procedures for testing computing devices in reaching target exercises. The ISO is based on Fitts's law [6] which models human psychomotricity behavior based on Shannon's theorem. This model establishes an index to define the effort of a reaching target task, the “index of difficulty”, based in two parameters: the target diameter (W) and the amplitude of the movement (A), (1). By means of this model, we can parameterize and limit the reaching target task on the screen.

$$ID = \log_2 \left(\frac{A}{W} + 1 \right) \quad (1)$$

3 METHODOLOGY

The test consisted in a reaching target task, performed through an eye-tracker system, bounded by the ISO 9241 standard, while a head tracking system measured the orientation of the head.

3.1 INSTRUMENTS

3.1.1 Eye-tracker (ET)

There are several type of eye-trackers. The less invasive ones are those based in video oculography. Among these, the ones based on infrared light (IR) are preferred due to their robustness and stability.

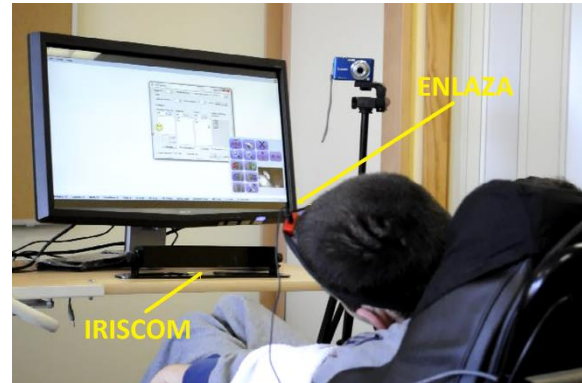


Figure 2. The aim of this study was to assess the movement of the head while severely affected users with motor disorders control the computer through their eyes. The figure illustrate a moment during the trial: the user's back, the eye-tracker and the head-tracker.

IR eye-trackers consists of two infrared light sources, which illuminate the eyes of the user and provide benchmarks to the tracking system. The IR produced must have a wavelength of 800 nm (found naturally in sunlight and incandescent lamps) and the power of the emitters should be according to the safety guidelines of the ACGIH. Besides the infrared light source, an infrared camera captures the reflected light. The infrared camera provides an image within a fixed horizontal band. Specific software interprets this image, calculates where the user is looking, and translates that position into new coordinates for the mouse pointer.

Eye-trackers allows the users to control a computer by his eye movements, substituting the standard mouse. Based on these criteria we have chosen the PRIMMA eye-tracker (IRISBOND, Spain).

3.1.2 Head-tracker (HT)

The movement of the head can be recorded with inertial measurement unit (IMU) systems. The IMU integrates a three-axis gyroscope, accelerometer and magnetometer.

The ENLAZA device complies with these requirements. It consists of a commercial helmet and an inertial measurement unit (IMU) [7]. This inertial

sensor was developed to measure kinematic parameters to describe pathologic patterns.

3.2 EXPERIMENTAL SETUP AND PROCEDURE

In the experiments, the eye-tracker system controlled the mouse pointer while the head-tracker measured the posture of the head. An automatic selection (click) was performed if the user kept the cursor within an area of 2 cm a time of 1 s. These area and time were defined by the occupational therapists, who had experience in the use of alternative communication system.

The participants were asked to perform reaching target tasks. They had to locate the cursor over the target as fast as possible by moving the eyes and then select it. All targets were displayed at the beginning of the test. The target that should be selected by the participant turned blue while the others remained gray, Figure 3. The software FittsStudy [8] was used to control the target position.

The indexes of difficulty (ID) of the tasks were defined by the ISO 9241-9, which depends on the: target diameter and movement amplitude. The values of the parameters of the tasks that the participant performed were: target diameter 75-100 pixels and movement amplitude 275-350 pixels.

The tasks were displayed on a monitor with a vertical resolution equal to 768 pixels and 1366 pixels of horizontal resolution. Figure 2 depicts a moment during the test.

Before the beginning of the test, a proper placement of the participants in front of the computer screen was granted. An occupational therapist was in charge of the position and posture of the users. The OT was asked to place the users in the vertical plane perpendicular to the center of the screen, at a distance between 60 and 80 cm. The OT made sure that the users were in the center of the eye tracker's track box before starting the test.

It took about 40 minutes per subject to complete a test. The task was interrupted if the user was feeling very tired or unmotivated, returning to resume the task after a moment, if possible.

3.3 PARTICIPANTS

Seven people with CP with severe motor disorders and three users without disabilities (acting as a control group) were recruited. The mean and standard deviation of the participants' ages are 29 and 6, respectively. The tests were carried out in ASPACE Cantabria (Santander, Spain). ASPACE Cantabria

therapists are experienced in the use of alternative devices such as the eye tracking interfaces.

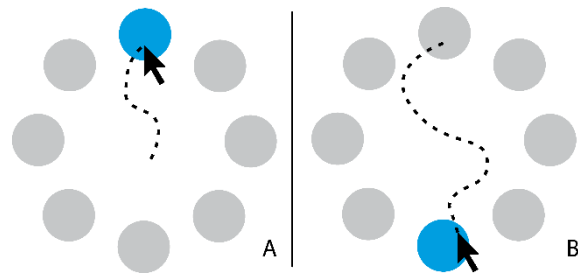


Figure 3. Subjects were asked to perform reaching target tasks, described by the index of difficulty defined by the ISO-9241. Participants locate the cursor over the target as fast as possible by moving the eyes and then select it.

Table. 1. Participants recruited with its age and clinical motor control descriptors. All the participants with CP are seriously affected by motor impairments.

Subject	Age	GMFCS / MACS	Cervical tone
CP1	28	5/5	Hypertonia
CP2	31	4/4	Hypotonia
CP3	37	4/4	Hypotonia
CP4	28	5/5	Hypertonia
CP5	22	4/5	Hypotonia
CP6	22	5/5	Hypotonia
CP7	36	5/4	Hypertonia
HP1	26	-	-
HP2	33	-	-
HP3	35	-	-

Deficits in trunk control affect the stability of the head as pointed out by Saavedra [10]. Consequently, pelvic and torso support was provided for those participants with poor trunk postural control.

All participants were men. None suffers from a severe intellectual disability. All the participants with CP used a wheelchair and had assistance requirements. They were classified as GMFCS between 4 and 5 [9]. In addition, all the users with CP had incremented or decremented muscle tone, which was described with the terms of Hypertonia and Hypotonia. Hypertonia is increased muscle tone, and lack of flexibility and Hypotonia otherwise. Table 1 describes the profile of the users. It is important to emphasize the severity of the motor disorder of the impaired group.

4 EXPERIMENTAL RESULTS

Both groups of users completed 1053 reaching target tasks. After data preprocessing, 679 of them were chosen: 475 from users with CP and 204 from users without disabilities. The rest were discarded due to a loss of synchronization between the devices or due to inconsistent measures.

Figure 4 shows the distribution of the error rate per participant. Data indicates that the CP participants had 59% more error rate than participants without disabilities, 45% and 27% respectively. The subjects distinguished by its error rate were CP3 and HP1, for their wide dispersion, relative to other participants.

4.1 HEAD RANGE OF MOTION (ROM)

The ROM values of the participants with CP were widely scattered. CP2 had the highest ROM in the frontal plane (82°) and CP6 had the lowest ROM value in the sagittal plane (2°). Both users were diagnosed with hypotonic tone.

There is not a relationship between the ROM of users with CP with the same tone (hypotonic or hypertonic). For example, the differences between the averages ROM of CP5 and CP6, who have a hypotonic tone, were 3°. However, there is a difference of 57° between CP2 and CP5, both of them with hypotonic tone also. The ROM of the users with hypertonic CP (CP1 and CP7) were higher than the ROM of users with hypotonic CP (CP3, CP5 and CP7), as was expected, except for the case of CP2.

Some users with CP have a ROM similar to the ROM of the user without disabilities. This is the case of CP5 (with hypotonic tone), who has an average ROM similar to the average ROM of HP.

The frontal plane of the users with cerebral palsy and had the highest ROM value, followed by the transversal and sagittal.

ROM is related to the ability to maintain posture, which has a direct involvement in the eye-tracker measurement. We concluded that users with CP have greater ROM value than users without disabilities.

Table 2 summarizes the metrics presented, for the participants with CP and without disabilities. It depicts the mean and standard deviation value for each case.

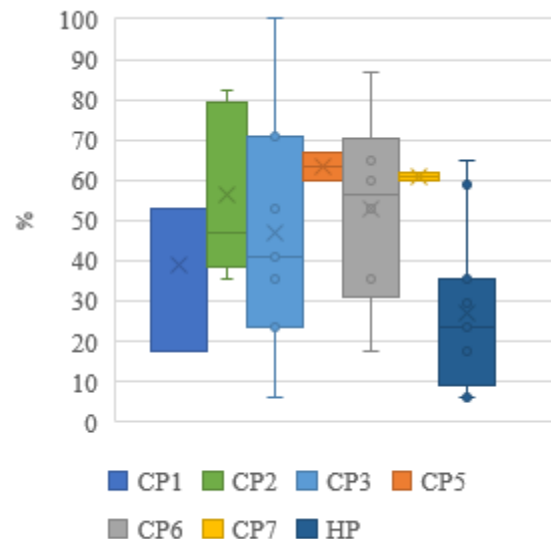


Figure 4. Mean error rate (%) of each user with its standard deviation.

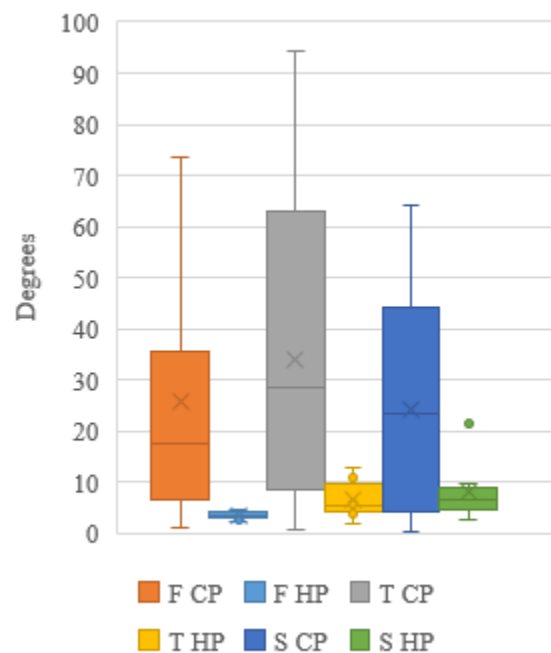


Figure 5. Mean ROM (°) of each user with its standard deviation, from each anatomical plane: frontal (F), transversal (T), and sagittal (S).

4.2 HEAD PEAK FREQUENCY (HPF)

Unlike the ROM, which had the highest value in the transversal plane, the head peak frequency was highest in the sagittal plane.

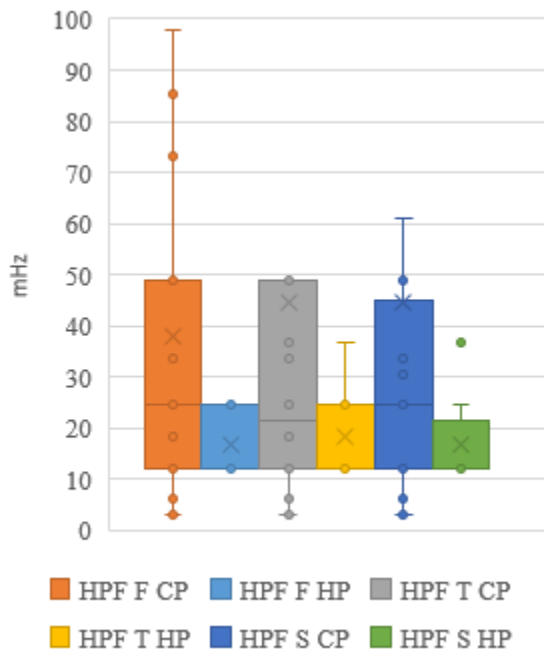


Figure 6. Mean head peak frequency (mHz) of each user, with its standard deviation, from each anatomical plane.

Involuntary movements from users with CP had higher frequency components than the voluntary movements from users without disabilities. The HPF measured in users with CP was approximately two times the HPF estimated in users without disabilities.

Unlike what happened with the ROM, where the tone of the participant was reflected in the ROM, the HPF value between the users with CP is less scattered.

Most of the users with hypertonia had a greater HPF than the users with Hypotonia.

5 DISCUSSION

The aim of this paper was to establish an assessment method for the evaluation of cervical motor characteristics while people with severe motor disabilities controlled a computer through their eyes. In addition, we evaluated our method with users with CP.

Eye tracking systems require to keep the head in a stable position inside its track box. Many users with CP are not able to do this, due to their poor cervical control. This limits the use of the eye tracker, reducing the performance metrics.

We measured the maximum head rotation range in the three defined planes and we found that its value in the frontal plane was 34°, 39° in the transversal, and in 28° in the sagittal. In a study presented by Raya et al, they

measured the ROM while users severely affected by motor disorders controlled a computer through their head movements [11]. They measured a ROM value of 25° in the frontal plane, 26° in the sagittal and 32° in the transversal. We argued that due to the head based control of their study; the users maintained their head within a more closed range, unlike our control paradigm, which does not require the user any kind of control of the head.

Frontal, transverse and sagittal head range of motion were highly variable among all participants with CP. High ROM value indicates that users with CP suffer from limitations in maintaining the posture, an important feature for the design of an appropriate interface. There is not a strong relation between ROM and the profile of participants with CP (hypertonic/hypotonic). Comparatively, it can be concluded that the users with CP generally have greater ROM than users without disabilities, in the order of 40° in the transversal plane, 34° in the frontal and 28 in the sagittal.

Table 2. Mean and standard deviation of each metric for each group of users.

Metrics	CP	HP	Unit
ERR	45±25	27±19	%
ROM F	34±24	3±1	degree
ROM T	40±31	6±4	degree
ROM S	29±22	8±6	degree
HPF F	38±42	17±6	mHz
HPF T	41±55	18±9	mHz
HPF S	44±66	17±9	mHz

The head peak frequency from users with CP was in the order of 40 mHz for all the planes, approximately two times bigger than the peak from users without disabilities. Velasco et al measured the head movement, but when user with CP control the computers by this gesture [12]. They also measured the head peak frequency, reporting the following values: 580 mHz, 540 mHz, and 680 mHz for the frontal, sagittal, and transversal planes. These values are one order of magnitude higher than the values that we have measured. The main reason of this difference could be the use of the head movement to control the cursor on the screen.

6 CONCLUSION

We presented a methodology and metrics for the assessment of head movements while user with cerebral palsy severely affected with motor disorders controlled a computer with their eyes.

The methodology is based in the standard ISO 9241-9 and two specially defined metrics, related to the head movements, in order to provided rigorous and comparable results: the head range of motion and the head peak frequency.

Experimental results suggest that users with CP had a head movement range of motion of 28° to 39°, and a head peak frequency of 40 mHz. All values were greater than the values measured from users without disabilities, mainly because they had better control than subjects with CP.

Knowing the characteristics of the users' head movements is essential, since posture and control limitation of people with CP decreased the eye-trackers performance. The head motor descriptors we measured must be used as a design requirement, so as to meet the inherent requirements of these complex users. This is also relevant for the HCI community, since there is lack of scientific works based on quantitative methodologies to assess the motor behavior of persons with severe motor disorders.

Acknowledgments

This work was possible thank to the projects NetMD (RTC-2015-3967-1), NeuroMOD (DPI2015-68664-C4-1-R), and InterAAC (RTC-2015-4327-1). They are all financed by the Spanish Ministry of Economy, Industry and Competitiveness. Special thanks to ASPACE-Cantabria team, especially to T. Gonzalez and A. Ruiz.

Bibliography

- [1] M. Bax, M. Goldstein, P. Rosenbaum, A. Leviton, N. Paneth, B. Dan, B. Jacobsson, and D. Damiano, "Proposed definition and classification of cerebral palsy," *Dev. Med. child Neurol.*, vol. 47, no. 8, pp. 571–576, Jul. 2005.
- [2] J. O. Wobbrock and K. Gajos, "A comparison of area pointing and goal crossing for people with and without motor impairments," in *Proceedings of the 9th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility*, 2007, pp. 3–10.
- [3] J. O. Wobbrock, J. Fogarty, S. Liu, S. Kimuro, and S. Harada, "The angle mouse: target-agnostic dynamic gain adjustment based on angular deviation," in *SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2009, pp. 1401–1410.
- [4] R. Raya, E. Rocon, J. a Gallego, R. Ceres, and J. L. Pons, "A robust Kalman algorithm to facilitate human-computer interaction for people with cerebral palsy, using a new interface based on inertial sensors," *Sensors*, vol. 12, no. 3, pp. 3049–3067, Jan. 2012.
- [5] "Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) - Part 9: Requirements for non-keyboard input devices ISO/DIS 9241-9." .
- [6] P. M. Fitts, "The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. 1954.," *J. Exp. Psychol. Gen.*, vol. 121, no. 3, pp. 262–269, Sep. 1992.
- [7] R. Raya, E. Rocon, R. Ceres, and M. Pajaro, "A mobile robot controlled by an adaptive inertial interface for children with physical and cognitive disorders," in *Technologies for Practical Robot Applications (TePRA), 2012 IEEE International Conference on*, 2012, pp. 151–156.
- [8] J. O. Wobbrock, K. Shinohara, and A. Jansen, "The effects of task dimensionality, endpoint deviation, throughput calculation, and experiment design on pointing measures and models," in *Proceedings of the 2011 annual conference on Human factors in computing systems - CHI '11*, 2011, p. 1639.
- [9] R. Palisano, P. Rosenbaum, S. Walter, D. Russell, E. Wood, and B. Galuppi, "Development and reliability of a system to classify gross motor function in children with cerebral palsy.," *Dev. Med. child Neurol.*, vol. 39, no. 4, pp. 214–23, Apr. 1997.
- [10] S. Saavedra, M. Woollacott, and P. Van Donkelaar, "Head stability during quiet sitting in children with cerebral palsy: Effect of vision and trunk support," *Exp. Brain Res.*, vol. 201, pp. 13–23, 2010.
- [11] R. Raya, E. Rocon, R. Ceres, J. M. Belda, and J. Laparra, "Positive and negative motor signs of head motion in cerebral palsy an analysis based on a wearable inertial human computer interface," *ISSNIP Biosignals Biorobotics Conf. Biosignals Robot. Better Safer Living*, pp. 1–5, Feb. 2013.
- [12] M. A. Velasco, R. Raya, R. Ceres, A. Clemotte, A. Ruiz, and T. González, "Positive and Negative Signs of Head Motion in Cerebral Palsy: Assessment of Impairment and Task Performance.," *IEEE Syst. J. Manuscr.*, vol. 8, no. 0, 2014.

DISEÑO DE SENSOR ÓPTICO DE FUERZA PARA EXOESQUELETO DE MANO

Díez J.A., Blanco A., Catalán J.M., Badesa F.J., Sabater J.M., García-Aracil N.
Universidad Miguel Hernández. jdíez@umh.es

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño preliminar de un sensor de fuerza integrable en un dispositivo de rehabilitación y asistencia de la mano de tipo exoesqueleto. Como alternativa a las tradicionales células de carga, cuya miniaturización es económicamente costosa, se plantea el uso de un sistema óptico similar a los utilizados en micrometría. Para ello se diseña un tren de elementos ópticos que es sensible a pequeñas deformaciones del elemento estructural que los soporta, traduciendo desviaciones del orden de décimas de milímetro en variaciones milimétricas de la proyección de un haz de luz. En este artículo se plantea la integración del sensor en un exoesqueleto de mano, se detalla el modelado del sistema óptico utilizado para el dimensionamiento de los elementos y finalmente se exponen los resultados de las pruebas de concepto realizadas con un primer prototipo.

Palabras clave: Sensor de fuerza, Exoesqueleto, Robótica de Rehabilitación

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ESTADO DEL ARTE

En la literatura actual es posible encontrar una gran variedad de dispositivos robóticos de tipo exoesqueleto que pueden actuar sobre los movimientos de la mano humana [1]. Parte de estos dispositivos, tales como [2, 3, 4], están diseñados para realizar terapias de rehabilitación; mientras que muchos otros están orientados a asistir los movimientos de la mano durante las actividades de la vida diaria [5, 6, 7].

Según la aplicación, un exoesqueleto de mano puede requerir características muy dispares. Por un lado, exoesqueleto destinado a rehabilitación necesita cierta reversibilidad de movimiento, con el fin de poder evaluar la evolución del paciente. Por otro, los robots de asistencia requieren rigidez y control sobre la interacción con los objetos, para garantizar un agarre firme y seguro.

Esta diversidad de requisitos da lugar a diversas arquitecturas de exoesqueleto:

- Algunos dispositivos usan mecanismos de barras para transmitir la fuerza desde el actuador a las articulaciones humanas. Esta es una arquitectura rígida que requiere de una correcta alineación entre los centros de giro del mecanismo y las articulaciones, pero a cambio permite un buen control de la postura de la mano. Debido a la flexibilidad de diseño, con el dimensionamiento correcto, este tipo de exoesqueletos puede conseguir patrones de movimiento complejos con actuadores simples.
- Otra arquitectura extendida es el guante actuado con cables. Esta es una alternativa más simple y flexible, que aprovecha las propias articulaciones de la mano para dirigir el movimiento, por lo que produce agarres más naturales. Por contra, se necesita un sistema de poleas para conseguir las fuerzas adecuadas, y se complica el control en posiciones intermedias. Además, este tipo de exoesqueletos necesita de un par de cables en configuración antagonista para asistir tanto la extensión como la flexión de la mano.
- Finalmente, ciertos dispositivos utilizan actuadores deformables, tales como músculos neumáticos o aleaciones con efecto memoria, fijados directamente a la mano mediante un guante. Como resultado se obtienen sistemas muy ligeros y sencillos, pero los actuadores no se encuentran en la posición más favorable para conseguir grandes fuerzas.

En los exoesqueletos basados en mecanismos de barras, especialmente aquellos que utilizan actuadores eléctricos, resulta interesante tener una medida de la fuerza de interacción entre dispositivo de usuario para facilitar el control y mejorar la seguridad. En ciertos dispositivos se han implementado diferentes tecnologías de sensor, tales como sensores de par [8], galgas extensiométricas [9], sensores de flexión [10] o células de carga miniaturizadas [11], entre otros. Estos sensores, aunque

efectivos, presentan ciertas deficiencias para su utilización en exoesqueletos, ya que los sensores miniaturizados tales como células de carga o FSR sólo miden fuerza en sentido, y aquellos que pueden medir fuerza en ambos sentidos resultan demasiado grandes a escala de la mano humana.

1.2 SOLUCIÓN PROPUESTA

En este artículo se propone la utilización de sensores ópticos utilizados en micrometría [12, 13]. Estos sensores se basan en la medición de la desviación de un haz de luz que incide en un fotodetector. La incorporación de elementos ópticos en el sensor permite amplificar la desviación del haz de luz, por lo que es posible hacer detectables deformaciones del orden de micrómetros. En concreto, se propone utilizar un sensor formado por una fuente de luz no direccional, un pinhole que estrecha el haz de luz, una lente cilíndrica y un sensor optoelectrónico.

Con este tipo de sensor se pretende obtener una medida consistente con la fuerza de interacción entre un exoesqueleto de mano [14] y los puntos de anclaje con el usuario. Esta medida puede resultar interesante en desde diversos puntos de vista:

- Realimentación en un sistema de control de impedancia.
- Comparación con un valor umbral que limite la fuerza de interacción entre usuario y dispositivo.
- Detección de intención de movimiento.
- Medida para el desarrollo de sistemas objetivos de valoración clínica.

2 ASPECTOS DE DISEÑO

Durante el diseño de este dispositivo se ha estudiado en primer lugar el sistema óptico, con el fin de determinar las distancias entre elementos ópticos así como sus dimensiones y parámetros fotométricos. Con esta información, se procede a continuación a dimensionar los elementos estructurales que posicionarán los componentes ópticos además de diseñar las partes elásticas que regularán el comportamiento elástico del sistema.

2.1 SISTEMA ÓPTICO

Para amplificar las pequeñas deformaciones generadas en el bastidor del sensor, y así hacerlas medibles, se utiliza un haz de luz que es refractado por una lente de sección circular y focal comparable al tamaño del sensor (Fig.1). Debido al orden

de magnitud de la curvatura de la lente, el haz de luz refractado es muy sensible a desviaciones en el eje óptico del sistema, permitiendo obtener respuestas un orden de magnitud superiores a las perturbaciones. Finalmente la luz desviada es focalizada en un sensor optoelectrónico que permite detectar tanto la posición como la intensidad de la imagen. Para reducir el ángulo con el que la luz puede incidir en la lente, se interpone un *pinhole* entre ésta y el foco de luz, así se reduce el número de reflexiones parásitas que puedan interferir en el sistema.

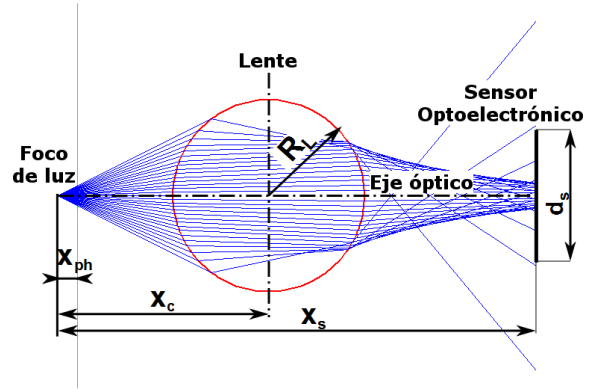


Figura 1: Arquitectura de sistema óptico.

En la arquitectura planteada, hay 5 parámetros geométricos libres, que corresponden a las separaciones entre elementos ópticos, al radio de curvatura de la lente y al tamaño del sensor optoelectrónico. Como primera aproximación al dimensionamiento del sensor, se ha utilizado un modelo de trazado de rayos, programado en Matlab, que calcula la intersección de cada rayo con la superficie de la lente y resuelve la ley de Snell en forma vectorial (1,2). Donde \vec{n}_i corresponde al vector director del rayo con módulo igual al índice de refracción del medio en que se propaga; \vec{u} a la normal a la superficie de refracción en el punto de incidencia; y θ al ángulo de refracción.

$$(\vec{n}_1 \times \vec{u}) \cdot (\vec{n}_2 \times \vec{u}) = n_1 n_2 \cos(\theta) \quad (1)$$

$$|\vec{n}_1 \times \vec{u}| = |\vec{n}_2 \times \vec{u}| \quad (2)$$

Con este modelo es posible calcular la distribución de rayos que inciden en el elemento fotosensible según la desviación de la lente respecto del eje óptico, permitiendo obtener una primera idea de cómo se va a comportar la luz y pudiendo comparar la sensibilidad de distintas configuraciones geométricas.

2.2 BASTIDOR DEFORMABLE

Las posiciones y direcciones preferentes de desviación del sistema óptico se restringen mediante una estructura cuya deformación pueda estimarse o calibrarse. En concreto, el bastidor del sensor se divide en tres componentes diferenciados:

- Un soporte de fuente de luz y componente fotosensible, que mantendrá de forma rígida la posición relativa de ambos elementos y actuará de interfaz con uno de los dos cuerpos cuya interacción se quiere medir.
- El alojamiento del elemento óptico, que se desplazará rígidamente respecto del elemento anterior y que estará unido al cuerpo restante.
- Elementos *punte* que unen las partes anteriores de forma elástica, y restringen las direcciones de deformación del sensor.

Se propone la utilización de plásticos técnicos tales como POM o ABS como material estructural, puesto que a la escala de fuerzas y pares desarrollados por la mano humana, los metales como el aluminio pueden resultar excesivamente rígidos y requerir partes demasiado delgadas, complicando la fabricación del dispositivo. A modo de ejemplo, en la figura 2 se muestra la deformación experimentada por el bastidor de un sensor de medidas equiparables a las falanges de los dedos. En este caso se obtiene una desviación de la lente de aproximadamente 0.05 mm y la tensión máxima registrada es tres veces inferior al límite elástico del material.

2.3 INTEGRACIÓN CON EXOESQUELETO

Como primera aproximación, se va a medir una fuerza de interacción unidireccional entre el usuario y el exoesqueleto, en dirección perpendicular al plano formado por el eje longitudinal de la falange del dedo y el eje de rotación de las articulaciones asociadas (Figura 3). De esta forma, al interactuar el dedo con el robot, se produce una deformación en la estructura del sensor que provoca un desplazamiento relativo entre la lente y el conjunto sensor optoelectrónico y fuente de luz (LED).

A diferencia de las tecnologías mencionadas anteriormente, con esta arquitectura se consigue medir únicamente la interacción entre usuario y dispositivo y no otros efectos, como las reacciones y fricciones internas del mecanismo que se añaden cuando se registra la fuerza desde el actuador; o las precargas e incertidumbres que aparecen cuando

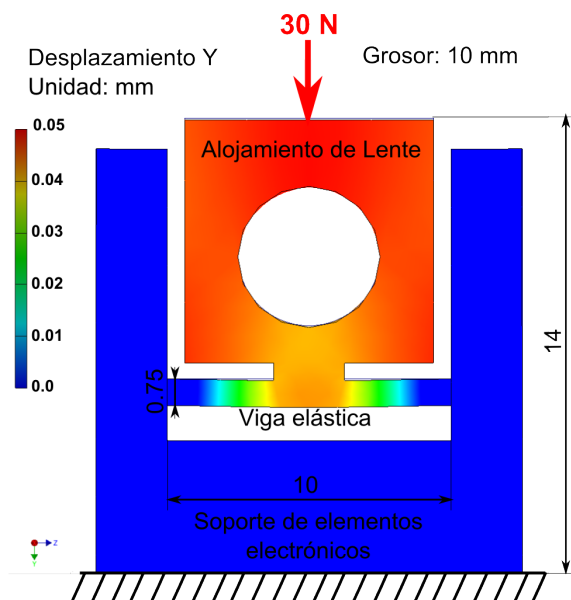


Figura 2: Análisis de tensión de bastidor fabricado en resina acetálica, sometido a una fuerza de compresión de 30 N.

se utiliza un sensor que debe estar en contacto con la piel, como es el caso de las células de carga de tipo botón.

3 PROTOTIPO Y PRUEBAS PRELIMINARES

3.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Se ha procedido a la fabricación de un prototipo inicial (Fig.4), con el fin de corroborar los cálculos teóricos y comprobar el efecto sobre el sistema de otros fenómenos no considerados; tales como la histéresis del material, los defectos en la lente o los errores en la alineación de los componentes ópticos.

Por simplicidad en la fabricación y el uso de este primer sensor, se ha optado por diseñarlo con unas dimensiones ligeramente mayores que las que tendría la versión integrada en un exoesqueleto. A continuación se resumen las características del sensor:

- Sistema óptico:
 - Fuente de luz: LED Kingbright APTD1608LSECK/J3-PF
 - Pinhole: Orificio de 1mm de diámetro en pared de 5mm de espesor
 - Lente: Cilindro de metacrilato de 5mm de diámetro, $n=1.49$
 - Sensor optoelectrónico: OPR5911 Quad Photodiode

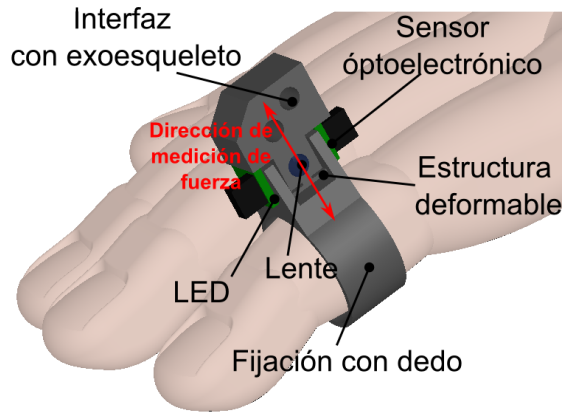


Figura 3: Detalle de sensor de fuerza sobre dedo y elementos que lo componen.

- $x_{ph} = 2$ mm
- $x_c = 11$ mm
- $x_s = 18$ mm

• Bastidor:

- Método de fabricación: Impresión 3D FDM
- Material: Plástico PLA
- Grosor del sensor: 13.5 mm
- Espesor de la viga: 1 mm
- Luz de la viga: 11 mm

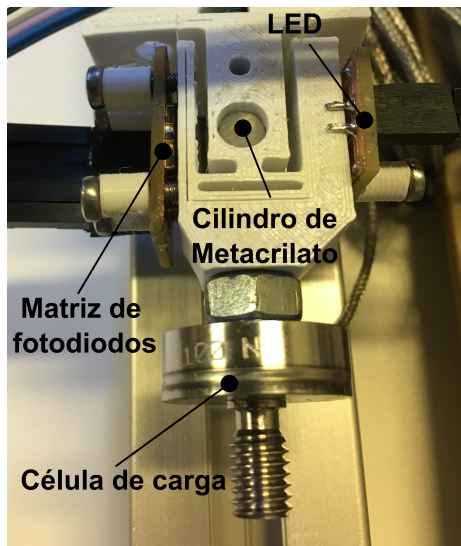


Figura 4: Montaje experimental con sensor y célula de carga en serie.

Con la potencia lumínica de trabajo, cada fotodiodo del sensor OPR5911 induce una corriente del orden de μA , por lo que es necesario un circuito de acondicionamiento de señal. De esta forma, la señal de cada fotodiodo se adapta para

la adquisición, mediante una etapa de conversión corriente-tensión seguida de una de amplificación (Figura 5). La adquisición se ha realizado mediante las entradas analógicas de una placa Genuino Uno.

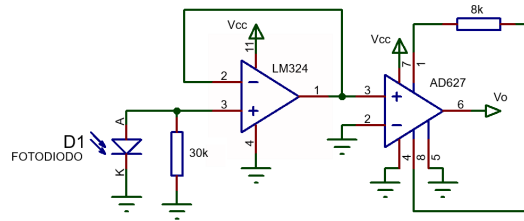


Figura 5: Circuito de acondicionamiento de señal para un fotodiodo.

3.2 PRUEBAS PRELIMINARES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para las pruebas de concepto se ha sometido al conjunto célula de carga y sensor óptico a cargas a tracción y compresión ejercidas por la mano de un sujeto sano. Para comparar las señales obtenidas en ambos sensores, se procede a la adquisición de una serie de muestras con ambos sensores descargados, de forma que es posible calcular el *offset* de la señal y establecerlo a cero. Adicionalmente, las señales se han normalizado a posteriori, dividiéndolas entre el valor máximo alcanzado, con el fin de que sean comparables.

En las figuras 6 y 7 se muestran los resultados de las pruebas. En ellas se puede observar un comportamiento dinámico similar, aunque el sensor óptico presenta pequeñas desviaciones frente a la célula de carga.

Por un lado, en los ensayos a tracción se pueden observar diferencias entre las medidas de ambas, siendo estas discrepancias distintas para cada valor de carga; sin embargo, este efecto apenas se aprecia cuando se trabaja a compresión. Este efecto puede deberse a una desalineación del eje óptico en reposo, que provoca que en compresión el sensor trabaje en una zona lineal de la curva de respuesta de este, mientras que a tracción está trabajando en una zona de transición no lineal (Figura 8):

Por otro lado, se puede observar que existe una apreciable histéresis en la descarga del sensor. Este fenómeno puede deberse a las propiedades de la pieza impresa en 3D, cuya estructura en láminas se acomoda de diferente forma al volver al reposo.

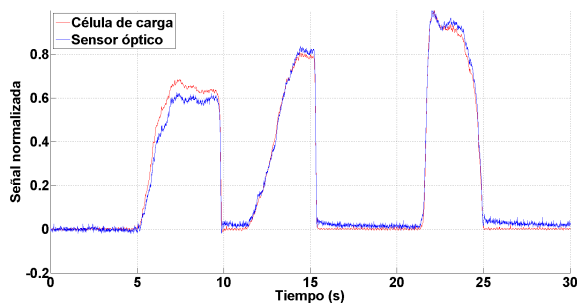


Figura 6: Resultados de los ensayos a tracción.

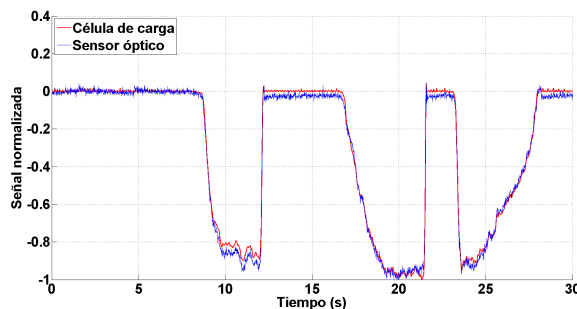


Figura 7: Resultados de los ensayos a compresión.

4 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

De las pruebas de concepto realizadas, se concluye que esta tecnología puede resultar una buena alternativa a otras tecnologías de sensado de fuerza en exoesqueletos. Podemos citar las ventajas más destacables:

- Medición de esfuerzos a tracción y compresión, lo que supone una gran ventaja frente a sensores de tipo FSR o células de carga de botón.
- Tamaño reducido: El uso de lentes de diámetros tan reducidos como 2 mm permite construir sistemas ópticos de dimensiones menores a las células de carga minia-

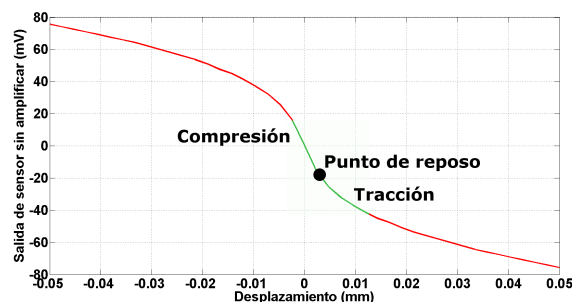


Figura 8: Simulación de respuesta de sensor óptico frente a deformación.

turizadas comerciales, como la utilizada en las pruebas de concepto.

- Alta sensibilidad: La respuesta del sensor diseñado requiere de un factor de amplificación menor que el que requieren las galgas. En la experimentación realizada, se utiliza una ganancia de alrededor de 30 para el sensor óptico, mientras que la célula de carga se amplifica por 500.
- Coste reducido: Todos los componentes utilizados se pueden encontrar de forma comercial por precios muy reducidos. Como elemento óptico se ha utilizado un cilindro de metacrilato cortado a partir de una varilla comercial. Los componentes optoelectrónicos como el LED y los fotodiodos son elementos que se producen de forma masiva a bajo coste. El bastidor de material plástico se puede fabricar de forma barata mediante tecnologías de impresión 3D para prototipos individuales, por molde de silicona y resinas para series pequeñas, o por inyección para series grandes. Cabe destacar que el coste total del sensor diseñado ronda los 10€, mientras que el precio de adquisición de la célula de carga con la que se ha comparado es 50 veces mayor.

En resumen, este tipo de sensor se plantea como una alternativa prometedora para la medición de fuerzas de interacción entre exoesqueletos y humanos. Si bien puede no ser la tecnología más interesante para la obtención de valores precisos de fuerza, sí presenta una potencial aplicación como señal de realimentación en un sistema de control, como medio de detección de intención o como interruptor de seguridad para evitar sobrecargas; donde se requiere más de un buen comportamiento dinámico que precisión de la medida.

En futuras investigaciones se trabajará en la obtención de un prototipo miniaturizado, que se pueda integrar en un exoesqueleto de mano. Además se revisará el diseño del bastidor flexible para mejorar la linealidad y poder obtener una curva de fuerza-deformación que permita un mejor análisis del comportamiento del sensor.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Comisión Europea a través del proyecto AIDE: Adaptive Multimodal Interfaces to Assist Disabled People in Daily Activities (Grant agreementno: 645322); por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto DPI2015-70415-C2-2-R; y por la Conselleria d'Educació, Cultura i Esport de la Generalitat Valenciana a través de las becas ACIF 2016/216 y APOTIP 2016/021.

Referencias

- [1] Heo, P., Gu, G. M., Lee, S. J., Rhee, K. and Kim, J. (2012). Current hand exoskeleton technologies for rehabilitation and assistive engineering. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(5), 807-824.
- [2] Brokaw, E. B., Black, I., Holley, R. J., and Lum, P. S. (2011). Hand Spring Operated Movement Enhancer (HandSOME): a portable, passive hand exoskeleton for stroke rehabilitation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 19(4), 391-399.
- [3] Mulas, M., Folgheraiter, M., and Gini, G. (2005, June). An EMG-controlled exoskeleton for hand rehabilitation. In *Rehabilitation Robotics, 2005. ICORR 2005. 9th International Conference on* (pp. 371-374). IEEE.
- [4] Kinetic Muscles Inc., ?Hand Physical Therapy with The Hand MentorTM,? <http://www.kineticmuscles.com/hand-physicaltherapy-hand-mentor.html>
- [5] Martinez, L. A., Olaloye, O. O., Talarico, M. V., Shah, S. M., Arends, R. J., and BuSha, B. F. (2010, March). A power-assisted exoskeleton optimized for pinching and grasping motions. In *Bioengineering Conference, Proceedings of the 2010 IEEE 36th Annual Northeast* (pp. 1-2). IEEE.
- [6] Yamada, Y., Morizono, T., Sato, S., Shimohira, T., Umetani, Y., Yoshida, T., and Aoki, S. (2001). Proposal of a SkilMate finger for EVA gloves. In *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on* (Vol. 2, pp. 1406-1412). IEEE.
- [7] Tadano, K., Akai, M., Kadota, K., and Kawashima, K. (2010, May). Development of grip amplified glove using bi-articular mechanism with pneumatic artificial rubber muscle. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on* (pp. 2363-2368). IEEE.
- [8] Schabowsky, C. N., Godfrey, S. B., Holley, R. J., and Lum, P. S. (2010). Development and pilot testing of HEXORR: hand EXOskeleton rehabilitation robot. *Journal of neuro-engineering and rehabilitation*, 7(1), 36.
- [9] Shields, B. L., Main, J. A., Peterson, S. W., and Strauss, A. M. (1997). An anthropomorphic hand exoskeleton to prevent astronaut hand fatigue during extravehicular activities. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics-part A: systems and humans*, 27(5), 668-673.
- [10] Takagi, M., Iwata, K., Takahashi, Y., Yamamoto, S. I., Koyama, H., and Komeda, T. (2009, May). Development of a grip aid system using air cylinders. In *Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on* (pp. 2312-2317). IEEE.
- [11] Chiri, A., Vitiello, N., Giovacchini, F., Roccella, S., Vecchi, F., and Carrozza, M. C. (2012). Mechatronic design and characterization of the index finger module of a hand exoskeleton for post-stroke rehabilitation. *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, 17(5), 884-894.
- [12] Tada, M., and Kanade, T. (2005, August). Design of an MR-compatible three-axis force sensor. In *Intelligent Robots and Systems, 2005.(IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on* (pp. 3505-3510). IEEE.
- [13] Su, H., and Fischer, G. S. (2009, November). A 3-axis optical force/torque sensor for prostate needle placement in magnetic resonance imaging environments. In *Technologies for Practical Robot Applications, 2009. TePRA 2009. IEEE International Conference on* (pp. 5-9). IEEE.
- [14] Díez, J. A., Catalán, J. M., Lledó, L. D., Badesa, F. J., and Garcia-Aracil, N. (2016). Multimodal robotic system for upper-limb rehabilitation in physical environment. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(9), 1687814016670282.

POSIBILIDADES DEL USO DE TRAMAS ARTIFICIALES DE IMAGEN MOTORA PARA UN BCI BASADO EN EEG

Josep Dinarès-Ferran^{1,2}
(dinares@gtec.at, josep.dinares@uvic.cat)

Christoph Guger¹ y Jordi Solé-Casals²

¹g.tec medical engineering Spain SL, C/ Plom 5, 08038 Barcelona, España

²Universitat de Vic ó Universitat Central de Catalunya, C/ de la Laura 13, 08500, Vic, España

Resumen

La utilización de una interfaz cerebro-computadora basada en el paradigma de la imagen motora requiere un entrenamiento para adaptar el sistema al cerebro del usuario. Este proceso de adecuación para crear un clasificador útil requiere un número muy elevado de tramas de señal EEG, y adquirir esas tramas requiere tiempo. Así, ahorrar tiempo de entrenamiento puede incrementar el tiempo dedicado al uso de la aplicación de la interfaz. Utilizando la descomposición EMD (Empirical Mode Decomposition) sobre las tramas EEG y mezclando sus IMFs (Intrinsic Mode Function), es posible crear nuevas tramas EEG artificiales e incrementar el número total de tramas para entrenar el clasificador. Los resultados preliminares del estudio muestran que las tasas de error de los clasificadores creados con tramas reales y artificiales mezcladas son similares a las tasas de error del clasificador creado solo con tramas reales. Estos resultados deberán ser confirmados con estudios futuros donde se pueda hacer una validación estadística de los mismo.

Palabras Clave: BCI, EMD, Empirical Mode Decomposition, Interfaz cerebro-computadora, imagen motora, EEG.

1 INTRODUCCIÓN

Las interfaces cerebro-Computadora (ICC), o Brain-Computer Interfaces (BCI) en inglés, son sistemas capaces de controlar dispositivos externos solo con las señales del cerebro [1]. Un BCI se divide en tres partes principales:

1. Sistema de adquisición de las señales cerebrales.
2. Sistema de procesamiento.
3. Sistema externo.

Hay diferentes sistemas de adquisición y su elección depende de la aplicación a dar al BCI [1], [2]. La

utilización de gorros EEG (Electroencefalograma) permite conseguir sistemas no invasivos con una resolución temporal alta, y que son adecuados para aplicaciones en tiempo real [2]. Las señales EEG son diferencias de potencial eléctrico de distintos puntos del cuero cabelludo y son la respuesta a la activación o disparo de las neuronas como respuesta a un estímulo externo. La sincronización a esta respuesta de diferentes grupos de neuronas dará lugar a una mayor diferencia de potencial que puede ser captado y transferido al sistema de procesamiento.

Un ordenador, o una unidad de procesamiento, hará la tarea de procesar las señales de EEG (sistema de procesamiento). Estas señales son altamente ruidosas y para capturar la información necesaria en ellas se utilizan técnicas de filtrado y de detección de patrones [1]. Los paradigmas son las instrucciones que sigue el usuario de la BCI y que permiten provocarle respuestas cerebrales conocidas que pueden ser detectadas por el sistema de procesamiento, y ser utilizadas para la actuación sobre el sistema externo, el cual puede ser un monitor o cualquier dispositivo controlado con señales digitales.

Según cual sea la aplicación a la que se destina el BCI, se utilizará el paradigma adecuado [3]ó[5]. Uno de los más utilizados es la imagen motora (Motor Imagery) [6], consistente en que el sujeto se imagine el movimiento de una de sus manos durante unos segundos. Esta imaginación activa zonas de la corteza motora muy similares a las que se activan cuando se ejecuta el movimiento real de la mano. Así, las aplicaciones de BCI basadas en la imagen motora posibilitan la elección entre dos acciones en función de si uno se está imaginado el movimiento de una u otra mano.

Recientemente, los BCI basados en señales EEG y la imagen motora están comenzando a utilizarse en la neurorrehabilitación de pacientes que han perdido la movilidad en una de sus extremidades superiores como consecuencia de un ictus [7], [8]. También se están utilizando para la comunicación en pacientes con desorden de consciencia [9], [10].

2 PROBLEMÁTICA

Al no ser el cerebro una estructura idéntica entre diferentes personas, las señales EEG derivadas de los paradigmas pueden contener diferencias sutiles. Es por esto que en general los sistemas BCI precisan de una de calibración, o entrenamiento, previo a su uso, consiguiéndose así que el BCI se adapte a las especificaciones de las señales EEG de cada usuario.

Para conseguir esta adaptación se utiliza un clasificador de la señal de EEG. Debido a que la señal eléctrica del cerebro debe atravesar el cráneo y los tejidos de la cabeza, esta llega muy debilitada al amplificador y con una muy baja relación señal a ruido, y además con una baja resolución espacial. Para generar un clasificador bueno con todos estos impedimentos, se necesitan una cantidad alta de repeticiones de los patrones para poder promediarlos y obtener una relación señal a ruido superior. Cuantas más repeticiones se consigan, mejor calidad señal, y mejor clasificador.

En el caso de BCI basados en la imagen motora este proceso es más largo que en otros paradigmas, y en la mayoría de caso añade un tiempo importante e imprescindible para el control adecuado del sistema. En el caso de aplicaciones destinadas a la neurorrehabilitación donde los usuarios son pacientes con distintos grados de minusvalía, estos periodos largos de tiempo pueden llegar a ser una molestia. Y cuanto más corto sea el tiempo destinado a la calibración, mayor puede ser el tiempo destinado a la aplicabilidad del BCI, y mayor puede ser el beneficio conseguido.

3 USO DE EMD PARA GENERAR NUEVAS TRAMAS

3.1 PARADIGMA DE IMAGEN MOTORA

La imagen motora del sujeto se obtiene gracias a la definición de un paradigma. Este consiste en que el sujeto debe imaginarse haciendo la dorsiflexión de una de sus dos muñecas durante ocho segundos, durante los cuales se guardaran los datos de EEG. Cada segmento de ocho segundos del sujeto imaginándose el movimiento se llama trama (Figura 1). Al inicio de cada trama el sujeto recibirá una indicación sonora sobre cuál de las dos muñecas debe imaginarse el movimiento. El paradigma determinará de una forma pseudo-aleatoria el lado (derecho o izquierdo) en cada nueva trama, hasta obtener un número predeterminado de tramas iguales para cada lado.

Al finalizar el paradigma se tendrán un número N de tramas de señal EEG de 8 segundos para cada lado ($N/2$ para el lado derecho y $N/2$ para el lado

izquierdo). Estos dos conjuntos de tramas son los utilizados para entrenar el clasificador que se utilizará en tramas posteriores para determinar el lado que el sujeto se está imaginando el movimiento.



Figura 1: Trama del paradigma de imagen motora. Los primeros dos segundos el sujeto está relajado. A los dos segundos suena un pitido y a continuación suena una indicación sonora del lado a imaginarse.

3.2 GENERAR NUEVAS TRAMAS

Como la calidad del clasificador es directamente proporcional al número de tramas de cada lado, tener un número elevado de tramas es vital para que el sujeto tenga un buen control del BCI [11]. Dadas las limitaciones para obtener un número elevado de tramas reales, se quiere estudiar la posibilidad de crear tramas artificiales a partir de las tramas reales ya existentes.

Por la naturaleza no lineal y no estacionaria de las señales EEG, se estima oportuno utilizar la descomposición EMD [12] para generar estas nuevas tramas artificiales.

3.3 EL ALGORITMO EMD

El algoritmo EMD (Empirical Mode Decomposition) es un método de descomposición de señales que permite analizar señales de naturaleza no-estacionaria y no-lineal.

La EMD descompone la señal en un número finito y pequeño de funciones intrínsecas llamadas IMFs (Intrinsic Mode Functions) que representan las oscilaciones características de la señal. Cada IMF debe satisfacer dos condiciones: (i) el número de cruces por cero y el número de máximos será igual, o al menos diferente de uno, para todo el conjunto de datos; y (ii) en cualquier punto, el valor medio de la

envolvente definida por el máximo local y la definida por el mínimo local, será cero [12].

Para una señal cualquiera, los pasos para obtener sus funciones IMF son los siguientes:

- (i) determinar el máximo y el mínimo local para la señal
- (ii) generar la envolvente superior e inferior conectando esos máximos y mínimos locales respectivamente, con un método de interpolación
- (iii) determinar la media local $m(t)$ haciendo la media de la envolvente superior e inferior de la señal.
- (iv) sustraer la media local de los datos: $s_1(t) = x(t) - m(t)$
- (v) si $s_1(t)$ cumple con el criterio de parada, se puede definir $s_1(t) = s_1(t)$ como a una IMF, sino se asigna $s_1(t) = |s_1(t)|$ y se vuelve a empezar el proceso en (i).

Una vez finalizado el algoritmo, la señal se puede definir a partir de sus IMFs (1). Quedando definida como:

$$x(t) = \sum_{n=1}^N \text{IMF}_n(t) + \varepsilon_n(t) \quad (1)$$

Donde n es el número de IMFs obtenidas de la EMD, y $\varepsilon_n(t)$ es una constante o la media de la tendencia.

3.4 NUEVAS TRAMAS

Como se puede apreciar en (1), una señal descompuesta con la EMD se puede recuperar completamente a partir de sus IMFs y del residuo. Del mismo modo, si cambiásemos una de sus IMFs por una IMF de otra señal descompuesta previamente, obtendríamos de (1) otra señal diferente. Con esta idea se pretende combinar diferentes IMFs de diferentes señales de EEG para crear una nueva señal EEG distinta a cualquiera de las señales originales que han contribuido con su IMF. Aun así, esta señal resultante de este proceso de creación artificial, mantendrá una estructura y unas características similares a las de las señales contribuidoras.

Una trama está formada por señales de EEG de ocho segundos de duración cada uno, teniendo tantas señales como canales EEG. Para crear nuevas tramas artificiales se utilizarán IMFs de otras tramas obtenidas de correr el paradigma. La selección de las tramas contribuidoras se hará aleatoriamente y solo se tendrá en cuenta que todas pertenezcan a la misma clase (lado derecho o lado izquierdo) que la trama artificial a generar, y que solo contribuyan con una sola IMF para cada trama artificial nueva.

4 MÉTODO

4.1 IMPLEMENTACIÓN DEL PARADIGMA

La implementación del paradigma se ha realizado con un sistema (recoveriX de g.tec medical engineering GmbH) que provee una interfaz gráfica que permite correr el paradigma y guardar los datos para su procesamiento posterior. El sistema está compuesto de un gorro EEG de 16 canales (g.SCARABEO de g.tec medical engineering GmbH) puestos justo encima del córtex sensoriomotor según el sistema internacional 10/10: FC5, FC1, FCz, FC2, FC6, C5 C3, C1, Cz, C2, C4, C6, CP5, CP1, CP2, CP6. El electrodo de la posición Fpz está conectado a tierra, i en el lóbulo de la oreja derecha hay un electrodo de referencia. El gorro EEG está conectado a un amplificador biomédico (g.USBamp de g.tec medical engineering GmbH), que a su vez está conectado mediante un cable USB al ordenador.

Cada vez que finaliza el paradigma el sistema proporciona los datos en bruto de donde se puede obtener las tramas para su procesamiento posterior, diferenciadas por el lado del movimiento a imaginar (derecha o izquierda). El paradigma recoge un total de 80 tramas: 40 para el lado derecho y 40 para el lado izquierdo. A este conjunto de tramas se le llama colección de tramas.

4.2 PROCESADO DE LOS DATOS

4.2.1 Preprocesado de la señal

Una vez obtenidos los datos estos se procesan en diferentes fases. Cada trama consta de 16 señales (una por canal) de 8 segundos con una frecuencia de muestreo de 256 Hz, y una indicación de la clase a la que pertenece (derecha o izquierda). A cada una de las señales se les aplica un filtro digital de 8-30 Hz.

4.2.2 Obtención de un clasificador

Para la obtención de un clasificador las tramas se separan en dos grupos según sea su clase (imaginación del movimiento de la muñeca derecho o izquierdo), y a continuación se calcula un filtro espacial CSP (Common Spatial Pattern) [13][14].

Una vez obtenido los parámetros del CSP, utilizando solo los dos primeros y los dos últimos vectores, se aplican a todas las tramas, obteniéndose una matriz de datos para cada trama con 4 canales EEG de 8 segundos. A estas señales se efectúa un cálculo continuo de la varianza de su amplitud en una ventana de 1.5 segundos. Estos valores de varianza, una vez normalizados, representan las características que se utilizarán para entrenar el clasificador LDA (Linear Discriminant Analysis)[7].

Así, para un conjunto de tramas se obtiene un clasificador formado por los parámetros del CSP y los parámetros del LDA. Para asegurar que el clasificador no esté sobreentrenado se aplicará un proceso de validación cruzada.

4.2.3 Cálculo de la tasa de error del clasificador

Para la evaluación de un clasificador se utiliza su tasa de error. Una tasa de error elevada significa que el clasificador no es capaz de determinar a qué clase pertenecen las tramas. Para calcular la tasa de error se necesitan un clasificador y una colección de tramas (donde cada trama tendrá asociada una clase). A cada una de las tramas se las pasa por el clasificador, obteniendo a cada muestra (256 muestras cada segundo) y a la salida del clasificador el valor de la clase a la que pertenece. Si la clase resultante del clasificador no coincide con la real de la trama, esa muestra se indica como errónea. Una vez finalizadas todas las muestras de todas las tramas se calcula el porcentaje de fallos, obteniendo la tasa de error.

La tasa de error se diferencia en dos valores: derecha e izquierda. De esta forma se puede diferenciar el error cuando se clasifican las tramas del lado derecho y las del lado izquierdo.

4.3 CREACIÓN DE TRAMAS ARTIFICIALES

A partir de una colección de tramas se creará una nueva colección de tramas en la cual se van a reemplazar un número determinado de tramas reales por tramas artificiales (el mismo número de tramas para cada una de las clases). Así, si se cambia una trama correspondiente al lado derecho, se debe también reemplazar una del lado izquierdo.

Para proceder a hacer la transformación de la colección de tramas, se seleccionan aleatoriamente entre todas las tramas las que se van a reemplazar. Las otras tramas, serán las que contribuirán con sus IMFs en la obtención de las nuevas tramas artificiales. Para cada una de las tramas artificiales se seleccionará aleatoriamente cual es la trama que le cede su primera IMF, cual es la que le cede su segunda IMF, y así sucesivamente hasta obtener todas las IMFs. Con todas las IMFs seleccionadas aleatoriamente y aplicando la fórmula (1), obtenemos la trama artificial.

Como una trama está compuesta de 16 canales, cada trama que cede su IMF para una trama nueva, en realidad cederá las 16 IMF que corresponden a sus 16 canales. Así, en realidad se están creando 16 señales nuevas para cada trama.

4.4 PROCEDIMIENTO

Para el experimento solo se utiliza una única colección de 80 tramas (40 para cada clase) que se han obtenido de un sujeto sano de 37 años. A partir de esta colección de tramas se crean otras ocho colecciones de tramas, cada una con un número diferente de tramas artificiales: 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30 y 40. Para cada colección de tramas se calcula su clasificador, obteniendo un total de nueve clasificadores (el de la colección original y los ocho de las colecciones con tramas artificiales).

El siguiente paso es calcular la tasa de error de cada uno de los nueve clasificadores, utilizando los datos de la colección de tramas originales. No se van a considerar todas las muestras de los ocho segundos que dura una trama, sino que solo se consideran las muestras a partir de los 3.5 segundos hasta el final de la trama. Es en estos momentos cuando el usuario ya ha recibido la señal acústica y ya se está imaginando el movimiento de la muñeca.

5 RESULTADOS

En la Tabla 1 se muestran los resultados del experimento para cada uno de los clasificadores y para cada una de las clases.

Tabla 1: Tasa de error de cada clasificador

Clasificador	Derecha	Izquierda
0 tramas artificiales	6,63	2,66
2 tramas artificiales	8,30	3,21
4 tramas artificiales	7,66	2,26
6 tramas artificiales	9,05	3,38
8 tramas artificiales	9,23	1,36
10 tramas artificiales	8,47	1,80
20 tramas artificiales	11,51	0,92
30 tramas artificiales	6,72	4,05
40 tramas artificiales	3,62	6,62

El primer clasificador es el que se ha generado con la colección de tramas original, y comparando sus resultados con los de los otros clasificadores se puede ver que el comportamiento es siempre mejor para el lado izquierdo que para el derecho, exceptuando los dos últimos clasificadores. También se puede apreciar que cuantas más tramas artificiales en la colección, mejor es la tasa de error para el lado izquierdo y peor para el lado derecho, exceptuando también los dos últimos casos.

Los dos últimos clasificadores tienen unas tasas de errores bajas y muy similares a las del clasificador sin tramas artificiales, a pesar de tener un porcentaje muy elevado de tramas artificiales en la colección que los generó.

6 DISCUSIÓN

Los resultados del experimento muestran que todos los clasificadores tienen una tasa de error similar a la tasa de error del clasificador generado con la colección de tramas original. Esto quiere decir que se podría utilizar uno de los clasificadores con tramas artificiales para utilizar el BCI, siendo el proceso de entrenamiento más corto porque se hubieran precisado menos tramas reales para obtener la colección de tramas.

Estos buenos resultados se pueden explicar por cuatro motivos:

(i) La descomposición EMD se adapta muy bien a señales no-lineales y no-estacionarias como es el caso de las señales EEG.

(ii) Usando las IMFs de tramas reales se recoge su información subyacente que estará en las tramas artificiales.

(iii) Los clasificadores LDA tienen poca tendencia al sobreentrenamiento y una gran capacidad de generalización.

(iv) El clasificador LDA se obtiene después de una validación cruzada que ayuda a prevenir el sobreentrenamiento.

A pesar de todo esto, los resultados solo son preliminares, y es necesario validarlos estadísticamente para asegurar que es posible utilizar tramas artificiales de la colección existente para aumentar el número total de tramas. Para la validación estadística son imprescindibles la repetición varias veces del mismo experimento utilizando diferentes IMFs de diferentes tramas para crear las tramas artificiales. También será imprescindible repetir el experimento con un número suficiente de sujetos diferentes.

Agradecimientos

Programa de Doctorados Industriales, dentro del Departamento de Empresa y Conocimiento de la Generalitat de Catalunya.

Referencias

[1] J. R. Wolpaw, N. Birbaumer, D. J. McFarland, G. Pfurtscheller, and T. M. Vaughan, "Brain

Computer Interfaces for communication and control," *Front. Neurosci.*, vol. 4, no. 113, pp. 7676791, 2002.

[2] J. J. Shih, D. J. Krusienski, and J. R. Wolpaw, "Brain-computer interfaces in medicine," *Mayo Clin. Proc.*, vol. 87, no. 3, pp. 268679, Mar. 2012.

[3] M. Oehler, P. Neumann, M. Becker, G. Curio, and M. Schilling, "Extraction of SSVEP signals of a capacitive EEG helmet for human machine interface," *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, vol. 2008, no. factor 2, pp. 449564498, 2008.

[4] G. Pfurtscheller, "Functional brain imaging based on ERD/ERS," *Vision Res.*, vol. 41, no. 10611, pp. 125761260, May 2001.

[5] L. A. Farwell and E. Donchin, "Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials," *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, vol. 70, no. 6, pp. 510623, Dec. 1988.

[6] C. Guger, C. Kapeller, R. Ortner, and K. Kamada, "Motor Imagery with Brain-Computer Interface Neurotechnology," 2015.

[7] W. Cho *et al.*, "Paired Associative Stimulation Using Brain-Computer Interfaces for Stroke Rehabilitation: A Pilot Study," *Eur. J. Transl. Myol.*, vol. 26, no. 3, p. 6132, 2016.

[8] A. Ramos-Murguialday *et al.*, "Brain-machine interface in chronic stroke rehabilitation: a controlled study," *Ann. Neurol.*, vol. 74, no. 1, pp. 10068, Jul. 2013.

[9] C. Guger *et al.*, "Complete Locked-in and Locked-in patients: Command following assessment and communication with vibro-tactile P300 and motor imagery brain-computer interface tools," *Front. Neurosci.*, vol. 11, no. May, p. 251, 2017.

[10] C. Guger *et al.*, "Brain-Computer Interfaces for Assessment and Communication in Disorders of Consciousness," no. January. 2013.

[11] H. Ramoser, J. Muller-Gerking, and G. Pfurtscheller, "Optimal spatial filtering of single trial EEG during imagined hand

- movement,ö *IEEE Trans. Rehabil. Eng.*, vol. 8, no. 4, pp. 4416446, Dec. 2000.
- [12] N. Huang *et al.*, öThe empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis,ö *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 454, no. 1971, pp. 995, 903, 1998.
- [13] Z. J. Koles, M. S. Lazar, and S. Z. Zhou, öSpatial patterns underlying population differences in the background EEG,ö *Brain Topogr.*, vol. 2, no. 4, pp. 2756284, 1990.
- [14] Yijun Wang, Shangkai Gao, and Xiaornog Gao, öCommon Spatial Pattern Method for Channel Selelction in Motor Imagery Based Brain-computer Interface,ö in *2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference*, 2005, vol. 5, pp. 53926 5395.

EFECTOS SOBRE LA ERD EN TAREAS DE CONTROL DE EXOESQUELETO DE MANO EMPLEANDO BCI

S. Ezquerro, Juan A. Barios, A. Bertomeu-Motos, L. Lorente, N. Requena,
I. Delegido, Francisco J. Badesa, N. Garcia-Aracil
Universidad Miguel Hernández, Elche (Alicante) 03202,
abertomeu@umh.es

Resumen

Los estudios con interfaces cerebro-máquina basados en electroencefalografía (EEG) en el campo de la rehabilitación y ayuda a personas con movilidad reducida, típicamente basados la modulación de los ritmos sensoriomotores (SMR), han aumentado notablemente en estos últimos diez años. Unidos a la aparición de nuevas herramientas en rehabilitación, como son los exoesqueletos, prometen ser una poderosa alternativa terapéutica y rehabilitadora para la recuperación motora de las lesiones distales de los miembros superiores. Diez sujetos sanos han participado en este estudio, en el cual se cuantificó en tiempo real las modulaciones de los ritmos SMR en la banda alpha (8-12 Hz) durante una actividad de de imaginería motora (IM) (cierre de mano/relax) utilizando diferentes modalidades sensoriales como feedback: propioceptivo (utilizando un exoesqueleto de mano), auditivo y visual. Los resultados obtenidos muestran una incremento en la intensidad y la duración de la desincronización (ERD) en la banda alpha durante la IM utilizando el exoesqueleto.

Palabras clave: *Brain-computer interfaces, electromiography, motor imagery, exoskeleton.*

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de tecnología BCI (*Brain-Computer Interface*) basada en EEG (electroencefalografía) ha aumentado notoriamente en la última década en campos como la rehabilitación [1], entretenimiento o dirigidos a personas con discapacidad para la realización de las actividades de la vida diaria (AVDs) [2].

A través de BCI basado en EEG podemos observar la modulación de los ritmos sensoriomotores (SMRs), estos ritmos se registran en el área sensoriomotora primaria (M1) y son oscilaciones que ocurren en las bandas alpha (8-12 Hz) y beta (13-35 Hz). Una de las características principales de esta área es que su amplitud disminuye durante el movimiento y es similar cuando se repite el movimiento mentalmente a través de la Imaginería

Motora (IM) [3] [4]. Diferentes estudios han mostrado que las personas pueden aprender a modular la amplitud del SMR mediante la práctica de movimientos sencillos (mano o pie) a través de la IM [5] [6]. Este proceso se produce en bucle cerrado, es decir, el sistema reconoce los cambios de amplitud del SMR provocados por la IM y la respuesta es enviada al usuario en forma de feedback visual. Este procedimiento y la adaptación humano-máquina permite a los usuarios de BCI controlar su actividad SMR y utilizar estas modulaciones para controlar dispositivos de salida de manera asíncrona [7].

El objetivo principal de este estudio fue observar las modulaciones del SMR mediante la desincronización (ERD) o sincronización (ERS) de los potenciales en la banda alpha producidos en la corteza sensoriomotora primaria (M1) mediante tareas de imaginería motora (IM) empleando como instrumentos un sistema de BCI y un exoesqueleto de mano.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Participantes

Diez sujetos sanos han participado en este estudio durante 5 sesiones a lo largo de cinco semanas consecutivas con duración de 90 minutos por cada una. Los criterios de inclusión propuestos para este estudio fueron: adultos sanos sin ningún tipo de déficit cognitivo diagnosticado y diestros, debido a que el exoesqueleto empleado era para mano derecha. Los criterios de exclusión fueron aquellos que contradecían a los anteriores. Todos los participantes firmaron el consentimiento informado.

2.2. Diseño experimental

Las experimentaciones se realizaron en una sala tranquila y controlada. Todos los participantes se sentaron frente a una pantalla, la cual se empleaba para dar las órdenes de movimiento. El EEG se registró en cinco áreas (F3, C3, CZ, T3 Y P3, de acuerdo con el sistema internacional 10/20) y empleando un gorro EEG de neopreno (Neuroelectrics®), colocando como electrodos de referencia

Fz y C4 (Figura 1). La electrooculografía (EOG) fue registrada en concordancia a la localización estándar para EOG, en el canto externo de los ojos (LOC). El EEG se registró con una frecuencia de muestro de 200 Hz, y se realizó un filtrado paso banda entre 0.5-40 Hz.

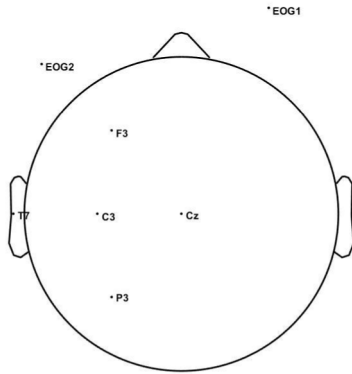


Figura 1: Esquema colocación de los electrodos en el encéfalo.

Para esta experimentación se empleó una versión de BCI2000, una plataforma multiusuario estándar [8], para la calibración y control online del BNCI. Esta calibración constaba de dos partes: (i) *Horizontal electrooculography* (HEOG), se registraron datos de los movimientos oculares de los sujetos (derecha o izquierda), con este registro se calculó la diferencia de potencial entre la córnea y la retina para emplearla como señal de aborto de un movimiento (Figura 2); (ii) *Threshold relax-close* (THRC), mediante una tarea de cierre, imaginando el movimiento de agarre, y una tarea de relax, se tomaron los valores de los ritmos sensoriomotores en la corteza motora izquierda. Estas instrucciones aparecían en la pantalla del ordenador de forma alternante. Estas indicaciones estaban separadas por un intervalo entre ensayos de unos 4-6 segundos (Figura 3).

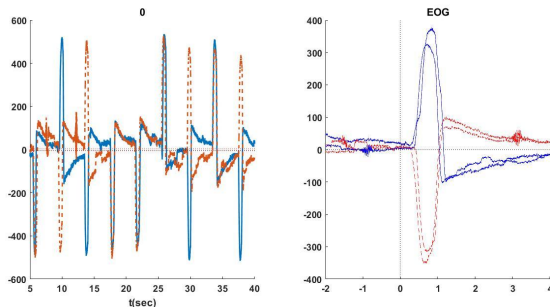


Figura 2: Ejemplo HEOG de un usuario después de la calibración.

Para facilitar al usuario la tarea de imaginación motora, se le presenta un *feedback* visual, en este caso

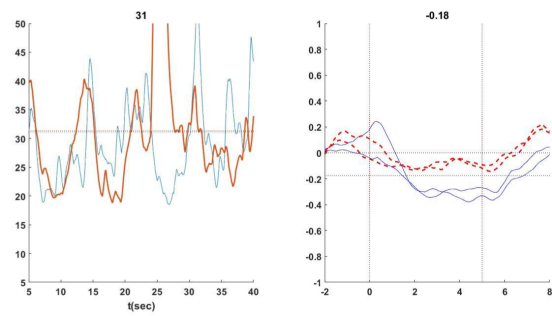


Figura 3: Ejemplo THRC de un usuario después de la calibración donde la línea continua corresponde al cierre (IM) y la línea discontinua al relax.

era la figura "Pac-Man", la cual comenzaba a cerrarse cuando el sujeto pensaba en la acción de cerrar la mano.

2.2.1. Exoesqueleto

El dispositivo es un robot tipo exoesqueleto con tres grados de libertad, que puede actuar de forma independiente sobre los dedos índice, corazón y el grupo anular-meñique. El movimiento de los dedos indicados se controla por medio de un mecanismo de barras que acopla las rotaciones de las falanges proximal y medial. Adicionalmente, el dispositivo permite fijar la posición del dedo pulgar mediante un mecanismo de barras regulable con opción de bloqueo. Este mecanismo se fija a las falanges proximales y mediales de cada dedo mediante unos anillos elásticos que se insertan por presión en el mecanismo (Figura 4).

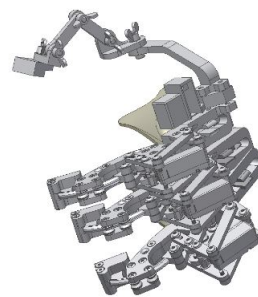


Figura 4: Diseño del exoesqueleto de mano.

A su vez, la mano se fija al bastidor mediante una órtesis ajustable por correas. En la tabla 1 se pueden observar las especificaciones técnicas del exoesqueleto.

2.3. Procesamiento de datos

Para el procesamiento y análisis de los datos EEG, se empleó la herramienta de Matlab, EEGLAB [9].

Tabla 1: Especificaciones técnicas del exoesqueleto de mano empleado en la experimentación.

Conjunto motor - Índice		
Potencia	2.52	[W]
Reducción	100:1	Adim
Fuerza máxima	50	[N]
Recorrido angular (MCP)	10 ÷ 45	[grados]
Recorrido angular (PIP)	15 ÷ 70	[grados]
Conjunto motor - Corazón		
Potencia	2.52	[W]
Reducción	100:1	Adim
Fuerza máxima	50	[N]
Recorrido angular (MCP)	10 ÷ 45	[grados]
Recorrido angular (PIP)	15 ÷ 70	[grados]
Conjunto motor - Anular y Meñique		
Potencia	2.52	[W]
Reducción	100:1	Adim
Fuerza máxima	50	[N]
Recorrido angular (MCP)	10 ÷ 45	[grados]
Recorrido angular (PIP)	15 ÷ 70	[grados]

Se realizó una serie de pasos de pre-procesado de los datos obtenidos. En primer lugar, se realizó un paso banda en la frecuencia 0.5 H. y un remuestreo de 500 a 128 Hz. El siguiente paso fue extraer las épocas de cada uno de los ensayos, para ello, subdividimos los intervalos en 11 segundos, 3 segundos pre-estímulo de la tarea y 8 segundos después del estímulo. De este modo, ambas condiciones pudieron ser comparadas. El punto de referencia (tiempo cero) fue asignado al comienzo del estímulo visual. La longitud de los intervalos, antes y después del punto de referencia, fueron escogidos como la longitud de los MRCP (aproximadamente 2 segundos). Una vez subdivididos en épocas se analizaron los posibles artefactos.

Se limitó el rango de frecuencia entre 0.5-48 Hz, así como, el periodo de tiempo en un rango de 3 segundos antes de la orden visual y 8 segundos después, tres segundos después de la orden marcando el final de la tarea. La longitud de las épocas EEG (de 3 a 8 segundos) abarcó puntos de tiempo más allá del período de interés, a fin de incluir una señal suficiente antes y después de los bordes de ese período de interés (0 y 5 segundos relativos al comienzo de la tarea). El rango de frecuencia que hemos incluido para todas las bandas de frecuencia del EEG fueron: δ (1-3 Hz), θ (4-7 Hz), α (8-12 Hz), β (13-30) y γ (30-48 Hz). Para el análisis estadístico, los métodos estaban incluidos en el mismo paquete de trabajo que se ha empleado.

3. RESULTADOS

3.1. Umbral relax-cierre (THRC)

En primer lugar, se analizaron los resultados de la calibración de la prueba THRC. Durante este ensayo, los sujetos a través de IM tenían que imaginar el movimiento de cierre de la mano. En la figura 5 se observan los cambios en el espectro de los eventos relacionados (ERSP) producidos por las modulaciones del SMR de todos los sujetos en C3 durante las cinco sesiones en la orden de cierre. Se observa una desincronización del potencial en la banda α (8-12 Hz) en todos los ensayos, pronunciándose cada vez más a lo largo del tiempo. Por otro lado, en la banda θ (4-8 Hz) se visualiza un aumento del potencial a lo largo de las sesiones.

3.2. Umbral con exoesqueleto

Una vez calibrado el sistema BCI y entrenados los sujetos, se registró actividad rítmica sensoriomotora durante el uso del exoesqueleto de mano. En la figura 6 se observan los cambios sensoriomotores (SMR) en la banda α (8-12 Hz), tanto en la orden de cierre como en la de relax. El espectro de la figura muestra una desincronización (ERD) en la banda alpha cuando el sujeto piensa en el movimiento de cierre de mano y se mantiene hasta el final de la orden. Mientras que en la tarea de relax (derecha), se observa que durante esta orden se produce una sincronización (ERS) en esta misma banda, es decir, el potencial se mantiene durante todo el tiempo.

En la Figura 7 se observan los cambios del SMR que se producen en los sujetos durante la actividad de IM (izquierda) y de relax (derecha), pero en esta prueba el sujeto no llevaba puesto el exoesqueleto, con estos resultados queríamos comprobar que efectos se producían en las modulaciones del SMR cuando al sujeto se le proporcionaba además de un estímulo visual (orden en la pantalla), un estímulo auditivo (sonido del exoesqueleto cerrando y abriéndose). Como en la anterior figura se puede visualizar que ocurren cambios en los potenciales de la banda alpha. No obstante, en la tarea de IM podemos observar que esta desincronización tiene una duración en el tiempo menor que en el caso anterior, volviendo a sincronizarse poco antes de los 4 segundos. En cuanto al relax, sucede lo mismo que en el caso anterior, los sujetos son capaces de mantener sincronizados los ritmos en la banda alpha.

4. DISCUSIÓN

Tras el análisis estadístico realizado con los datos obtenidos de los ensayos con BCI basados en

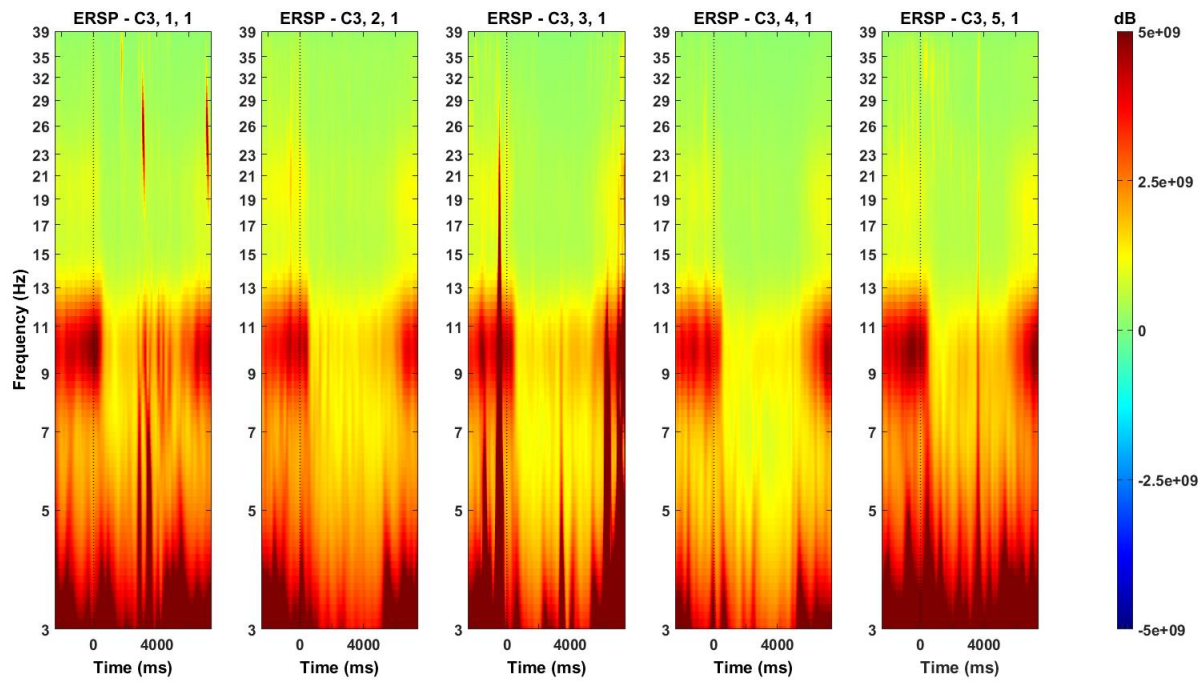


Figura 5: Modulaciones del SMR a lo largo de las cinco sesiones de entrenamiento de IM.

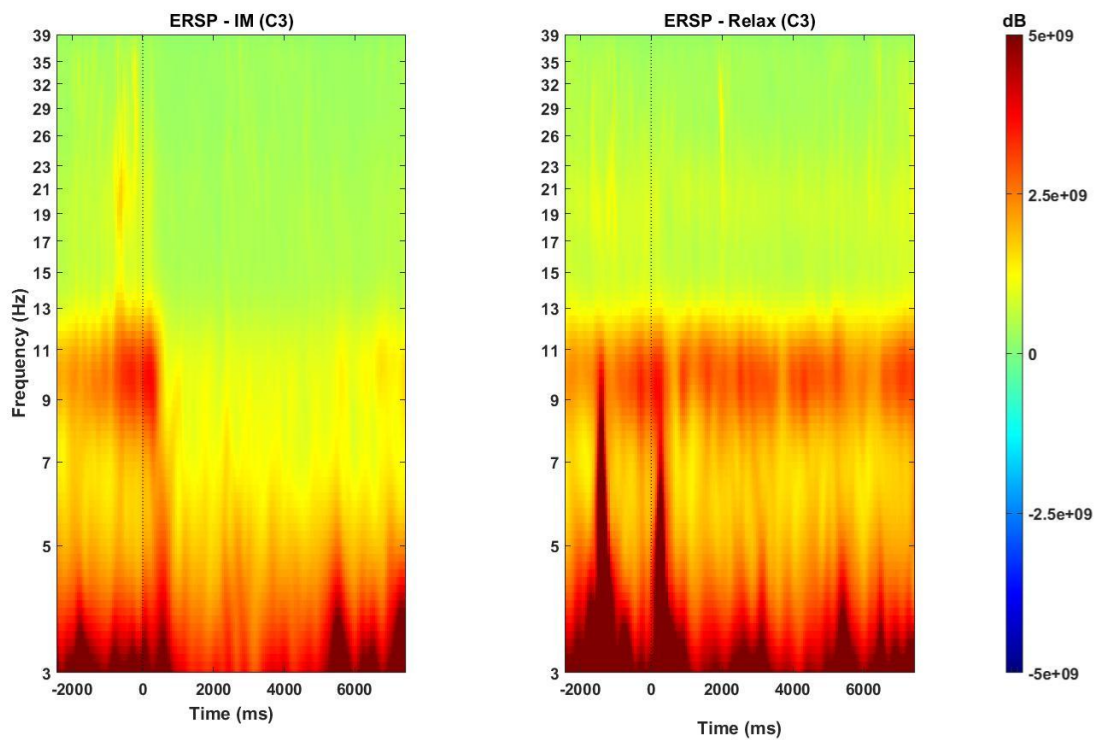


Figura 6: Cambios en el SMR durante la actividad de cierre por IM (izquierda), la actividad de relax (derecha) con el exoesqueleto colocado.

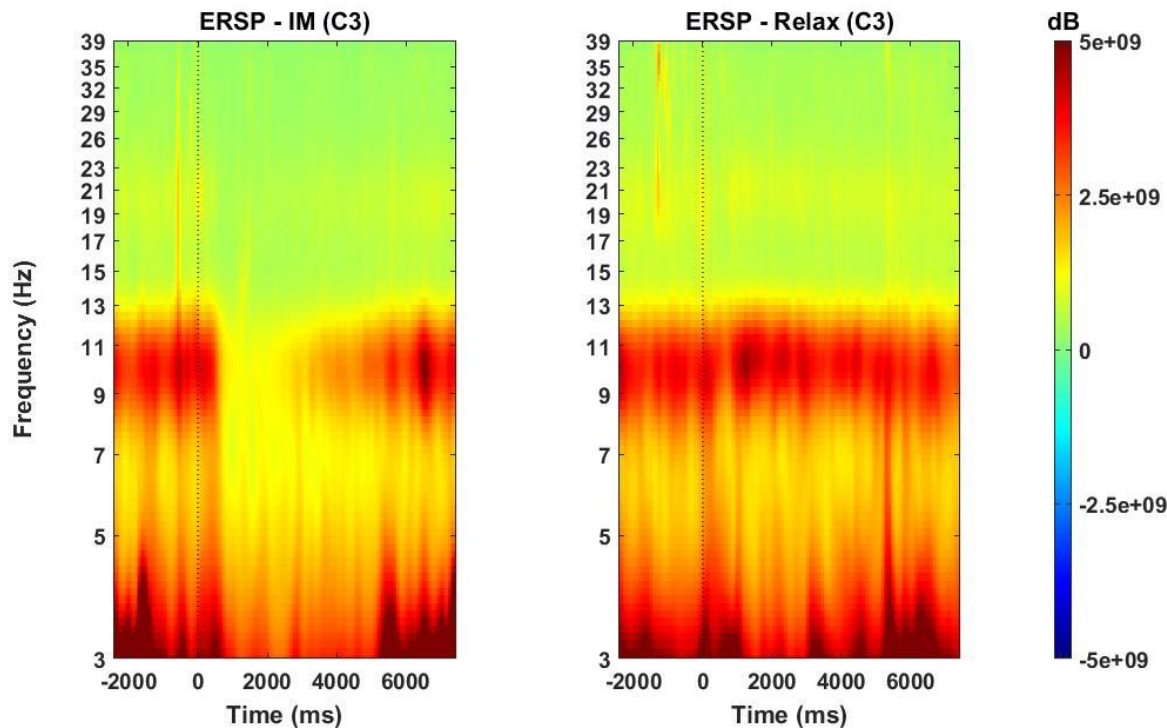


Figura 7: Cambios en el SMR durante la actividad de cierre por IM (izquierda), la actividad de relax (derecha) sin el exoesqueleto.

electromiografía y la literatura revisada para este ensayo podemos determinar que existe una activación de potenciales en banda alpha (8-12 Hz) en la corteza sensoriomotora primaria cuando imaginamos un movimiento de cierre de mano provocando así una ERD en dicha banda y volviendo a sincronizar en torno a los 5-6 segundos (fin de la orden visual). Así mismo esta ERD se hace más consistente con el entrenamiento en IM. También podemos observar un aumento de potencial en los ritmos lentos en la banda theta (4-7 Hz), lo que nos indica una inhibición de dichos ritmos. Estos datos nos revelan que existe una modulación en los cambios de potenciales y un aumento de desincronización en tareas de movimiento motor lo que nos indica un aprendizaje de imaginación motora por parte de los sujetos.

En cuanto a los resultados obtenidos en el entrenamiento con el exoesqueleto de mano, podemos observar que en ambos casos (entrenamiento con estímulo propioceptivo y con estímulo auditivo) se produce una ERD cuando el sujeto piensa en el movimiento de agarre a través de IM. No obstante, el tiempo de activación del SMR durante el entrenamiento con estímulo auditivo (sin exoesqueleto) es menor que si se le añade al entrenamiento un estímulo propioceptivo (con exoesqueleto), lo que nos lleva a pensar que el entrenamiento con el exoesqueleto puesto se ve reforzado por dicho

estímulo.

5. CONCLUSIONES

Durante el cierre voluntario del exoesqueleto mediante IM, hemos observado una desincronización en el SMR en la banda alpha que refleja la activación de la corteza sensoriomotora M1 a través de IM de un movimiento de cierre de mano. También hemos observado que estos ritmos se modulan con el tiempo con la progresión del entrenamiento de esta técnica, con una intensidad dependiente de la modalidad sensorial utilizada, lo que podría llegar a ser una buena herramienta en la rehabilitación de personas con algún tipo de déficit motor causado por alguna patología de origen traumática o neurológica.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Comisión Europea a través del proyecto AIDE: Adaptive Multimodal Interfaces to Assist Disabled People in Daily Activities (Grant agreement no: 645322) y por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto DPI2015-70415-C2-2-R.

Referencias

- [1] J. J. Daly and J. R. Wolpaw, "Brain-computer interfaces in neurological rehabilitation," *The Lancet Neurology*, vol. 7, no. 11, pp. 1032–1043, 2008.
- [2] G. Pfurtscheller, C. Brunner, A. Schlögl, and F. L. Da Silva, "Mu rhythm (de) synchronization and eeg single-trial classification of different motor imagery tasks," *NeuroImage*, vol. 31, no. 1, pp. 153–159, 2006.
- [3] G. Pfurtscheller and F. L. Da Silva, "Event-related eeg/meg synchronization and desynchronization: basic principles," *Clinical neurophysiology*, vol. 110, no. 11, pp. 1842–1857, 1999.
- [4] C. Neuper, R. Scherer, M. Reiner, and G. Pfurtscheller, "Imagery of motor actions: Differential effects of kinesthetic and visual-motor mode of imagery in single-trial eeg," *Cognitive brain research*, vol. 25, no. 3, pp. 668–677, 2005.
- [5] V. Kaiser, G. Bauernfeind, A. Kreilinger, T. Kaufmann, A. Kübler, C. Neuper, and G. R. Müller-Putz, "Cortical effects of user training in a motor imagery based brain-computer interface measured by fnirs and eeg," *Neuroimage*, vol. 85, pp. 432–444, 2014.
- [6] J. Toppi, M. Riseti, L. Quitadamo, M. Petti, L. Bianchi, S. Salinari, F. Babiloni, F. Cincotti, D. Mattia, and L. Astolfi, "Investigating the effects of a sensorimotor rhythm-based bci training on the cortical activity elicited by mental imagery," *Journal of neural engineering*, vol. 11, no. 3, p. 035010, 2014.
- [7] J. A. Pineda, D. S. Silverman, A. Vankov, and J. Hestenes, "Learning to control brain rhythms: making a brain-computer interface possible," *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 181–184, 2003.
- [8] G. Schalk, D. J. McFarland, T. Hinterberger, N. Birbaumer, and J. R. Wolpaw, "Bci2000: a general-purpose brain-computer interface (bci) system," *IEEE Transactions on biomedical engineering*, vol. 51, no. 6, pp. 1034–1043, 2004.
- [9] A. Delorme and S. Makeig, "Eeglab: an open source toolbox for analysis of single-trial eeg dynamics including independent component analysis," *Journal of neuroscience methods*, vol. 134, no. 1, pp. 9–21, 2004.

Formulación Topológica Adaptada para la Simulación y Control de Exoesqueletos Accionados con Transmisiones Harmonic Drive

Andrés F. Hidalgo Romero

Centro de Automática y Robótica (CAR)-CSIC-UPM, af.hidalgo@csic.es

Eduardo Rocón

Centro de Automática y Robótica (CAR)-CSIC-UPM, e.rocon@csic.es

Resumen

Los sistemas de transmisión Harmonic Drive son muy utilizados en sistemas robóticos donde se requieren altas precisiones de trabajo. Este es el caso de los exoesqueletos utilizados para la rehabilitación y asistencia de personas con problemas de movilidad. En la bibliografía existen diversos modelos de sistemas de transmisión Harmonic Drive, pero generalmente estos modelos son considerados de forma aislada, sin tener en cuenta su interacción con el entorno en el que son utilizados. Debido a la interacción que existe entre los exoesqueletos y las personas, es importante considerar los elementos de la transmisión de movimiento como una parte integral del sistema. Con este objetivo, en este artículo se presenta la inclusión de los sistemas Harmonic Drive dentro de una formulación topológica para la simulación de sistemas multicuerpo. El uso de coordenadas relativas hace que esta formulación sea especialmente idónea para el diseño de algoritmos de control para exoesqueletos donde los actuadores transmiten el movimiento a través de sistemas de transmisión Harmonic Drive. La formulación se ha implementado en Simulink y se ha presentado un ejemplo de control de posición en un modelo de exoesqueleto de una pierna con actuación en la cadera y la rodilla.

Palabras Clave: Sistemas Multicuerpo, Harmonic Drive, Exoesqueletos, Rehabilitación y asistencia, Simulación, Control.

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha habido un desarrollo creciente en la utilización de sistemas robóticos para ayudar a personas con problemas de movilidad. Este es el caso de los exoesqueletos utilizados para la rehabilitación y asistencia de personas que no pueden mover sus extremidades con normalidad. Los exoesqueletos generalmente se clasifican en dos grupos según sus sistemas de actuación sean pasivos o activos. En el primer caso se trata de dispositivos mecánicos

diseñados para almacenar energía durante una fase del movimiento de la persona y liberarla luego en otra fase ayudando a efectuar el movimiento. En el caso de los exoesqueletos activos, los movimientos se efectúan mediante actuadores cuyo movimiento debe controlarse continuamente durante todas las fases del movimiento del individuo.

Aunque los exoesqueletos pasivos presentan muchas ventajas potenciales, tienen aún bajas eficiencias en comparación con los dispositivos activos, por lo que estos últimos siguen siendo los más utilizados.

Uno de los aspectos más importantes de los exoesqueletos activos está relacionado con el control de movimiento, en donde el tipo de actuadores a utilizar tienen una gran influencia en los algoritmos. En este sentido, los actuadores rotativos eléctricos suelen preferirse frente a los lineales neumáticos debido a que son más sencillos de controlar. Por otro lado, los actuadores rotativos requieren de reductores de velocidad, siendo los sistemas Harmonic Drive (HD) uno de los más utilizados.

Los sistemas HD son muy utilizados para la transmisión de movimiento en robots con pares de Revolución (R) y que deben seguir trayectorias específicas con una determinada precisión. Esto se explica en gran medida por las altas relaciones de transmisión que pueden conseguirse con estos dispositivos. Esta característica es de especial importancia en unidades robóticas cuyos pares R deben seguir trayectorias angulares altamente no lineales de un modo preciso y seguro, como es el caso de los exoesqueletos mencionados previamente. Estos sistemas deben interactuar físicamente con las personas ayudándoles a mover las extremidades involucradas según trayectorias que cambian con el tiempo, adaptándose así al patrón de marcha y a los requerimientos del usuario. Las características intrínsecas de la marcha bípeda de personas con y sin patologías y la flexibilidad de adaptación requerida en los exoesqueletos demandan el diseño de algoritmos de control complejos. Estos controles utilizan como señales de entradas datos que provienen de la segmentación y detección de eventos de la marcha, que describen la cinemática de distintos

patrones de movimiento y que miden la fuerza de interacción entre el exoesqueleto y el usuario, entre otras variables.

Los exoesqueletos utilizados para tareas de rehabilitación generalmente siguen trayectorias y requieren estrategias de control menos variables que las de los exoesqueletos que son utilizados para tareas más generales de asistencia de movimiento. En este último caso la amplitud, frecuencia y el patrón de los movimientos pueden cambiar continuamente en el tiempo, como así también el tipo de control entre las distintas fases de la marcha.

En este sentido, la complejidad y no linealidad de los procesos involucrados en el control de exoesqueletos de asistencia dificultan el diseño de estrategias de control mediante métodos puramente deterministas. Estos algoritmos a su vez requieren de parámetros relacionados con la planta y los procesos, muy difíciles de obtener con métodos iterativos experimentales. En este sentido, el uso de modelos virtuales de simulación puede ser gran utilidad para estimar parámetros incluidos en los controles, como así también realizar pruebas con distintos algoritmos y estrategias de control. Para que estos controles aporten datos que sean de utilidad a la hora de ser implementados en el sistema real, es fundamental contar con modelos de plantas que reproduzcan de un modo fiel la dinámica y cinemática del sistema, como así también utilizar coordenadas adecuadas que faciliten el diseño del control.

Por ejemplo, el modelado de una articulación robótica con un par tipo R en la rodilla debería contemplar dos barras rígidas unidas cada una al muslo y pantorrilla respectivamente, un motor de corriente continua DC y la transmisión HD. Adicionalmente, como estas estructuras interactúan con personas, las inercias de las extremidades sumadas al efecto de las fuerzas de interacción entre el usuario y el exoesqueleto deben ser tenidas en cuenta.

El modelo mencionado anteriormente forma un sistema electromecánico en donde el motor y las barras más la transmisión HD pueden considerarse por separado. Existe una amplia variedad de modelos de motores en la bibliografía, por lo que su modelado no se menciona en este artículo. Por el contrario, si bien existen modelos de transmisiones HD en la bibliografía ([8], [3] y [5]), estos modelos frecuentemente aparecen como unidades aisladas o soportando cargas fijas y no como parte integral de un sistema mecánico en donde su interacción con el entorno puede inducir fluctuaciones en las fuerzas y torques externos.

Con el objetivo de obtener un entorno de simulación de estrategias de control, y dadas las ventajas que desde un punto de vista de investigación puede aportar tener un software de simulación propio frente a aplicaciones comerciales, en este artículo se presenta una metodología para incluir modelos de

transmisión HD dentro de una formulación topológica para la simulación dinámica y el control de sistemas multicuerpo.

Para ello se presenta inicialmente una formulación topológica semirrecursiva para la simulación dinámica de sistemas multicuerpo. La transmisión HD se introduce como caso especial de restricción dentro de la formulación. Toda la formulación se ha incluido en Simulink®, lo cual permitirá ejecutar distintos algoritmos de control, permitiendo a vez introducir elementos adicionales como por ejemplo modelos de motores que no se incluyen en este artículo.

Este artículo está dividido en dos secciones. En la primera sección se presenta la formulación topológica original en la cual se ha basado el trabajo de este artículo y se incluye también la adaptación realizada para poder incluir de un modo general restricciones de transmisiones HD dentro de la formulación de base. En la segunda sección se introduce un ejemplo de control de posición implementando la formulación topológica con el sistema HD aquí presentado. La formulación se ha introducido en Simulink y el modelo de sistema es un exoesqueleto con articulaciones en la cadera y en la rodilla.

2 FORMULACIÓN TOPOLÓGICA ADAPTADA

Se ha mencionado anteriormente la conveniencia de utilizar coordenadas relativas para desde un punto de vista del control

Los métodos topológicos, que se basan en el uso de coordenadas relativas, suelen denominarse como métodos recursivos o semirrecursivos. Dependiendo para ello de si debe o no resolverse un sistema de ecuaciones lineales para calcular las aceleraciones del sistema.

La formulación semirrecursiva presentada en este artículo está basada en la formulación semirrecursiva de Rodríguez y otros [6]. En términos generales, esta formulación inicialmente define el sistema mediante coordenadas Cartesianas, obteniéndose finalmente mediante una doble transformación de velocidades, una expresión de las ecuaciones del movimiento en función de las aceleraciones relativas independientes del sistema multicuerpo.

Cuando los sistemas son de cadena abierta, las aceleraciones relativas pueden obtenerse de forma completamente recursiva y solo se realiza una transformación de velocidades. Cuando los sistemas son de cadena cerrada, las cadenas se abren por determinados pares obteniéndose así un sistema de múltiples cadenas abiertas que se calculan de forma recursiva. Finalmente, las cadenas se cierran introduciendo las restricciones correspondientes a los pares por donde fueron abiertas. Al contrario de los

sistemas de cadena abierta, cuando los sistemas multicuerpo son de cadena cinemática cerrada, y las restricciones se imponen mediante el uso de coordenadas naturales [1] como se realiza en esta formulación, se requiere la resolución de un sistema de ecuaciones lineales para la obtención de las aceleraciones relativas del sistema, correspondiente a la segunda transformación de velocidades.

La formulación original utilizada en este artículo utiliza dos tipos de restricciones cinemáticas, las de los pares (tipo R) y prismáticos (tipo P), ya que todas las demás restricciones pueden definirse como combinaciones de éstas.

Con la adaptación introducida en este artículo se introduce un tipo de restricción adicional, la correspondiente a la transmisión HD. Como se verá más adelante, este tipo de transmisión impone una restricción constante en el tiempo, lo cual evita la necesidad de resolver un sistema de ecuaciones lineales para realizar la segunda transformación de velocidades cuando el sistema multicuerpo está cerrado únicamente por transmisiones tipo HD.

2.1 ECUACIONES DE CADENA ABIERTA

Las ecuaciones de la dinámica de un sistema multicuerpo de cadena abierta como el que se muestra en la Figura 1 se plantean fácilmente mediante las ecuaciones de Newton-Euler de cada uno de los sólidos que componen el sistema. De esta manera aparecen también en las ecuaciones las fuerzas internas de restricción que existen entre los pares cinemáticos que vinculan los elementos entre sí. Estos sistemas de cadena abierta tienen un sólido de entrada a la cadena, que suele ser un elemento fijo con respecto al sistema inercial. Cada elemento además posee puntos de entrada y salida que lo vinculan con sus elementos contiguos en la cadena cinemática.

La geometría de cada sólido se define mediante un sistema de coordenadas móvil y situado en el punto de entrada al mismo. Los pares cinemáticos se definen mediante coordenadas naturales [1], que consisten en puntos y vectores unitarios que definen la posición y orientación de los pares.

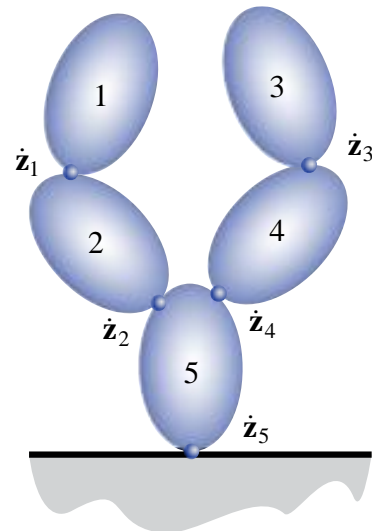


Figura 1. Sistema de cadena abierta

La posición y orientación de cada sólido se define inicialmente mediante las coordenadas Cartesianas del punto de entrada y su matriz de rotación. Aunque esta definición de la posición es redundante, luego se corrige mediante una transformación a coordenadas relativas.

Las velocidades y aceleraciones Cartesianas de un elemento se definen mediante los siguientes vectores

$$\mathbf{Z}_i \equiv \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{s}}_i \\ \boldsymbol{\omega}_i \end{Bmatrix}, \quad \dot{\mathbf{Z}}_i \equiv \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{s}}_i \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \end{Bmatrix} \quad (1)$$

donde $\dot{\mathbf{s}}_i$ y $\ddot{\mathbf{s}}_i$ representan la velocidad y aceleración del punto del sólido i que instantáneamente coincide con el origen del sistema de referencia inercial.

De esta forma, las velocidades y aceleraciones Cartesianas de los n elementos del sistema quedan definidas por los vectores

$$\mathbf{Z}^T = \{\mathbf{Z}_1^T \quad \mathbf{Z}_2^T \quad \cdots \quad \mathbf{Z}_n^T\}, \quad \dot{\mathbf{Z}}^T = \{\dot{\mathbf{Z}}_1^T \quad \dot{\mathbf{Z}}_2^T \quad \cdots \quad \dot{\mathbf{Z}}_n^T\} \quad (2)$$

Utilizando puntos y vectores unitarios, el par de revolución (tipo R) entre los sólidos $i-1$ e i como se muestra en la Figura 2 se define mediante el compartimiento de un punto y un vector unitario a la salida del sólido $i-1$ y entrada del i .

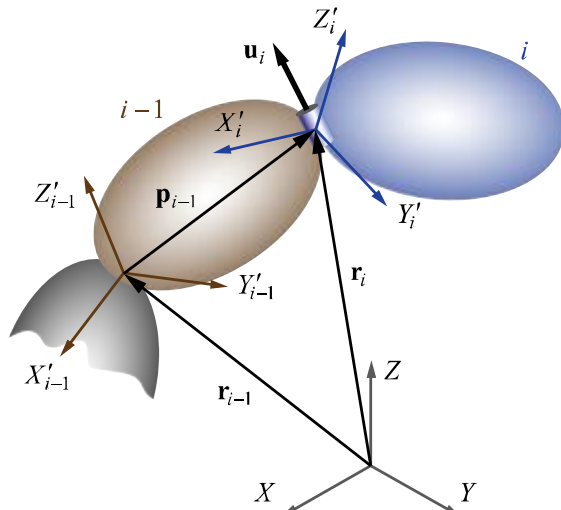


Figura 2. Par de revolución R

Como todos los elementos comparten el mismo punto de referencia (el origen de coordenadas), el cálculo de las velocidades y aceleraciones Cartesianas se hace en forma recursiva hacia adelante en función de las velocidades y aceleraciones relativas de una manera muy sencilla, ya que no se necesita ninguna matriz de transformación

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_i &= \mathbf{Z}_{i-1} + \mathbf{b}_i \dot{z}_i \\ \dot{\mathbf{Z}}_i &= \dot{\mathbf{Z}}_{i-1} + \mathbf{b}_i \ddot{z}_i + \mathbf{d}_i \end{aligned} \quad (3)$$

donde \dot{z}_i y \ddot{z}_i son la velocidad y aceleración relativa del par i y las matrices \mathbf{b}_i y \mathbf{d}_i tienen expresiones que dependen del tipo de par (tipo R o tipo P) considerado. Por simplicidad, la expresión de estos vectores se omite en este artículo, pero pueden encontrarse en la referencia [2].

Las ecuaciones de movimiento se expresan más fácilmente en función de las velocidades \mathbf{Y}_i y aceleraciones Cartesianas $\dot{\mathbf{Y}}_i$ basadas en el centro de masa del elemento y que están relacionadas con las \mathbf{Z}_i y $\dot{\mathbf{Z}}_i$ mediante las siguientes expresiones

$$\mathbf{Y}_i = \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{g}}_i \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & -\tilde{\mathbf{g}}_i \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{s}}_i \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \end{Bmatrix} \equiv \mathbf{D}_i \mathbf{Z}_i \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{Y}}_i &= \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{g}}_i \\ \ddot{\boldsymbol{\omega}}_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & -\tilde{\mathbf{g}}_i \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{s}}_i \\ \ddot{\boldsymbol{\omega}}_i \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \tilde{\boldsymbol{\omega}}_i \tilde{\boldsymbol{\omega}}_i \mathbf{g}_i \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \\ &\equiv \mathbf{D}_i \dot{\mathbf{Z}}_i + \mathbf{e}_i \end{aligned} \quad (5)$$

donde $\dot{\mathbf{g}}_i$ y $\ddot{\mathbf{g}}_i$ representan la velocidad y aceleración del centro de masas, $\dot{\boldsymbol{\omega}}_i$ y $\ddot{\boldsymbol{\omega}}_i$ la velocidad y aceleración angular del sólido i . Los vectores $\dot{\mathbf{s}}_i$ y $\ddot{\mathbf{s}}_i$ son la velocidad y aceleración del punto unido al sólido i que instantáneamente coincide con el origen del sistema inercial de coordenadas.

Considerando entonces las expresiones anteriores, el teorema de las potencias virtuales puede expresarse de la siguiente manera

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \mathbf{Y}_i^{*T} (\mathbf{M}_i \dot{\mathbf{Y}}_i - \mathbf{Q}_i) &= \\ \sum_{i=1}^n \mathbf{Z}_i^{*T} \mathbf{D}_i^T (\mathbf{M}_i \mathbf{D}_i \dot{\mathbf{Z}}_i + \mathbf{M}_i \mathbf{e}_i - \mathbf{Q}_i) &= \\ = \sum_{i=1}^n \mathbf{Z}_i^{*T} (\bar{\mathbf{M}}_i \dot{\mathbf{Z}}_i - \bar{\mathbf{Q}}_i) &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Donde el asterisco (*) representa las velocidades virtuales de cada elemento del sistema. Las matrices de la ecuación (7) tienen las siguientes expresiones

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_i &= \begin{bmatrix} m_i \mathbf{I}_3 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}_i \end{bmatrix} \\ \bar{\mathbf{M}}_i &= \mathbf{D}_i^T \mathbf{M}_i \mathbf{D}_i = \begin{bmatrix} m_i \mathbf{I}_3 & -m_i \tilde{\mathbf{g}}_i \\ m_i \tilde{\mathbf{g}}_i & \mathbf{J}_i - m_i \tilde{\mathbf{g}}_i \tilde{\mathbf{g}}_i \end{bmatrix} \\ \mathbf{J}_i &= \mathbf{A}_i \bar{\mathbf{J}}_i \mathbf{A}_i^T \\ \bar{\mathbf{Q}}_i &= \mathbf{D}_i^T (\mathbf{M}_i \mathbf{e}_i - \mathbf{Q}_i) \end{aligned} \quad (7)$$

donde las matrices \mathbf{A}_i y $\bar{\mathbf{J}}_i$ son la matriz de rotación y el tensor de inercia del elemento i representados en su sistema de coordenadas locales.

Para obtener una expresión global del sistema completo, donde la matriz de inercia es $\bar{\mathbf{M}}$, el vector de fuerzas externas es $\bar{\mathbf{Q}}$, y el vector de aceleraciones es $\dot{\mathbf{Z}}$ con las siguientes expresiones

$$\bar{\mathbf{M}} \equiv \text{diag}(\bar{\mathbf{M}}_1, \bar{\mathbf{M}}_2, \dots, \bar{\mathbf{M}}_n) \quad (8)$$

$$\bar{\mathbf{Q}}^T = [\bar{\mathbf{Q}}_1^T, \bar{\mathbf{Q}}_2^T, \dots, \bar{\mathbf{Q}}_n^T] \quad (9)$$

$$\dot{\mathbf{Z}}^T = [\dot{\mathbf{Z}}_1^T, \dot{\mathbf{Z}}_2^T, \dots, \dot{\mathbf{Z}}_n^T] \quad (10)$$

La ecuación de las potencias virtuales de todo el sistema queda definida por la expresión

$$\mathbf{Z}^{*T} (\bar{\mathbf{M}} \dot{\mathbf{Z}} - \bar{\mathbf{Q}}) = 0 \quad (11)$$

Puede observarse que en la ecuación (11) no aparecen las fuerzas internas de los pares debido a que no producen potencias virtuales.

Para obtener las ecuaciones de movimiento del sistema de cadena abierta en función de las coordenadas relativas del sistema, se introduce la primera transformación de velocidades de esta formulación. Para ello debe tenerse en cuenta que las velocidades virtuales \mathbf{Z}^* no son independientes, pero que pueden expresarse en función de las velocidades relativas del sistema mediante la matriz de transformación \mathbf{R} como indica la siguiente expresión

$$\mathbf{Z} = \mathbf{R}_1 \dot{z}_1 + \dots + \mathbf{R}_n \dot{z}_n = \mathbf{R} \dot{\mathbf{z}} \quad (12)$$

La columna j de la matriz \mathbf{R}_j , se calcula en forma directa de una manera muy sencilla porque sus elementos son las velocidades Cartesianas de los sólidos de la cadena que se encuentran por encima del par j , siendo estas velocidades originadas por una velocidad relativa unitaria en el par j y velocidades nulas en el resto de pares.

Siguiendo la sugerencia de Negrut y otros [4], donde los sólidos se han enumerado desde las hojas hasta la raíz, de tal forma que cada sólido tiene un número menor que su padre en la cadena cinemática, la matriz de transformación \mathbf{R} para un sistema como el de la Figura 3 tiene la siguiente expresión

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 & \mathbf{b}_2 & 0 & 0 & \mathbf{b}_5 \\ 0 & \mathbf{b}_2 & 0 & 0 & \mathbf{b}_5 \\ 0 & 0 & \mathbf{b}_3 & \mathbf{b}_4 & \mathbf{b}_5 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{b}_4 & \mathbf{b}_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{b}_5 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{I} & 0 & 0 & \mathbf{I} \\ 0 & \mathbf{I} & 0 & 0 & \mathbf{I} \\ 0 & 0 & \mathbf{I} & \mathbf{I} & \mathbf{I} \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{I} & \mathbf{I} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{b}_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{b}_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{b}_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{b}_5 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\equiv \mathbf{TR}_d$$

Donde \mathbf{I} es la matriz identidad 6x6, \mathbf{T} es la matriz de accesibilidad, definida por la conectividad del sistema, y \mathbf{R}_d es una matriz diagonal cuyos elementos son los vectores \mathbf{b}_i dependientes del tipo para en el punto de entrada.

Utilizando la expresión de la matriz \mathbf{R} de la ecuación (13), se definen las velocidades y aceleraciones Cartesianas en función de las relativas con las siguientes expresiones

$$\begin{aligned} \mathbf{Z} &= \mathbf{R} \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{TR}_d \dot{\mathbf{z}} \\ \dot{\mathbf{Z}} &= \mathbf{TR}_d \ddot{\mathbf{z}} + \dot{\mathbf{TR}}_d \dot{\mathbf{z}} \end{aligned} \quad (14)$$

Reemplazando las expresiones de la ecuación (14) en la ecuación de las potencias virtuales (11), se obtiene el sistema de ecuaciones de movimiento en función de las coordenadas relativas del sistema

$$\mathbf{R}_d^T (\mathbf{T}^T \bar{\mathbf{M}} \mathbf{T}) \mathbf{R}_d \ddot{\mathbf{z}} = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{R}_d^T \mathbf{T}^T (\bar{\mathbf{Q}} - \bar{\mathbf{M}} \mathbf{T} \dot{\mathbf{R}}_d \dot{\mathbf{z}}) \quad (15)$$

donde el vector $\boldsymbol{\tau}$ representa las fuerzas exteriores generalizadas.

2.2 ECUACIONES DE CADENA CERRADA

Cuando los sistemas son de cadena cerrada, las aceleraciones relativas de la ecuación (15) ya no son independientes, por lo tanto, las ecuaciones de movimiento de sistemas de cadena cerrada se obtienen considerando las restricciones que relacionan estas coordenadas. Esto puede realizarse de una forma muy eficiente subdividiendo el conjunto de coordenadas relativas entre dependientes e independientes. De esta manera, las coordenadas relativas dependientes pueden expresarse en función de las independientes considerando el núcleo del espacio nulo de la matriz Jacobiana de las ecuaciones de restricción con respecto al vector de coordenadas relativas Φ_z .

Por ejemplo, las ecuaciones de restricción del cierre de cadena de un par tipo R como el de la Figura 3 se expresan muy fácilmente como sigue

$$\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_k = \mathbf{0} \quad (3 \text{ ec. independientes}) \quad (16)$$

$$\mathbf{u}_j - \mathbf{u}_k = \mathbf{0} \quad (2 \text{ ec. independientes}) \quad (17)$$

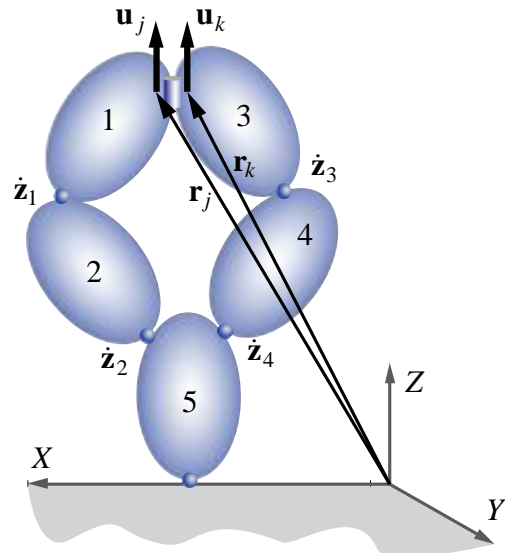


Figura 3. Cierre de cadena por un par R

Debido a que las ecuaciones de restricción están expresadas mediante coordenadas naturales, el cálculo de la matriz Jacobiana Φ_z requiere el uso de la regla de la cadena como indica la siguiente expresión

$$\Phi_z = \Phi_{r_j} \frac{\partial \mathbf{r}_j}{\partial \mathbf{z}} + \Phi_{u_j} \frac{\partial \mathbf{u}_j}{\partial \mathbf{z}} + \Phi_{r_k} \frac{\partial \mathbf{r}_k}{\partial \mathbf{z}} + \Phi_{u_k} \frac{\partial \mathbf{u}_k}{\partial \mathbf{z}} \quad (18)$$

Utilizando el método de partición de coordenadas de [9] y [7], se obtienen los conjuntos de velocidades relativas dependientes e independientes como sigue

$$\Phi_z \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{0}, \quad \begin{bmatrix} \Phi_z^d & \Phi_z^i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{z}}^d \\ \dot{\mathbf{z}}^i \end{Bmatrix} = \mathbf{0} \quad (19)$$

$$\dot{\mathbf{z}}^d = -\Phi_z^d \setminus \Phi_z^i \dot{\mathbf{z}}^i$$

Donde las coordenadas dependientes se eligen de tal forma que aseguren que Φ_z^d es invertible.

De esta forma se obtiene la matriz \mathbf{R}_z correspondiente a la segunda transformación de velocidades relativas de dependientes a independientes

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{R}_z \dot{\mathbf{z}}^i, \quad \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{z}}^d \\ \dot{\mathbf{z}}^i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\Phi_z^d)^{-1} \Phi_z^i \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \dot{\mathbf{z}}^i \quad (20)$$

$$\mathbf{R}_z \equiv \begin{bmatrix} -(\Phi_z^d)^{-1} \Phi_z^i \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}$$

Derivando las velocidades relativas de la ecuación (20) se obtienen las aceleraciones relativas

$$\ddot{\mathbf{z}} = \mathbf{R}_z \ddot{\mathbf{z}}^i + \dot{\mathbf{R}}_z \dot{\mathbf{z}}^i \quad (21)$$

Finalmente, las ecuaciones de movimiento de cadena cerrada se obtienen reemplazando la ecuación (21) en la ecuación (15), quedando expresadas de la siguiente manera

$$\mathbf{R}_z^T \mathbf{R}_d^T \mathbf{M}^\Sigma \mathbf{R}_d \mathbf{R}_z \ddot{\mathbf{z}}^i = \mathbf{R}_z^T \boldsymbol{\tau} + \mathbf{R}_z^T \mathbf{R}_d^T \mathbf{Q}^\Sigma - \mathbf{R}_z^T \mathbf{R}_d^T \mathbf{T}^T \bar{\mathbf{M}} \mathbf{T} \mathbf{R}_d \dot{\mathbf{z}} - \mathbf{R}_z^T \mathbf{R}_d^T \mathbf{T}^T \bar{\mathbf{M}} \mathbf{T} \mathbf{R}_d \dot{\mathbf{R}}_z \dot{\mathbf{z}}^i \quad (22)$$

2.3 RESTRICCIONES DEL SISTEMA HARMONIC DRIVE (HD)

Cuando se utilizan coordenadas globales (naturales en este caso) para definir las ecuaciones de restricción, la matriz \mathbf{R}_z se obtiene numéricamente. Como se verá a continuación, cuando el sistema multicuerpo está cerrado por uniones o pares correspondientes a sistemas de transmisión tipo HD, la matriz \mathbf{R}_z puede obtenerse de un modo más sencillo y eficiente, ya que permanece constante en el tiempo, evitando así la necesidad de resolver ningún sistema de ecuaciones.

Considerando un sistema multicuerpo como el exoesqueleto que se muestra en la Figura 5, la configuración del sistema HD consiste en el *circular spline* (CS), que se encuentra fijo a una de las extremidades de las barras. Por otro lado, el motor que transmite el movimiento al *wave generator* (WG) también está fijo al soporte del CS, con el WG

alojado dentro del elemento flexspline (FS), como se ve en la Figura 4

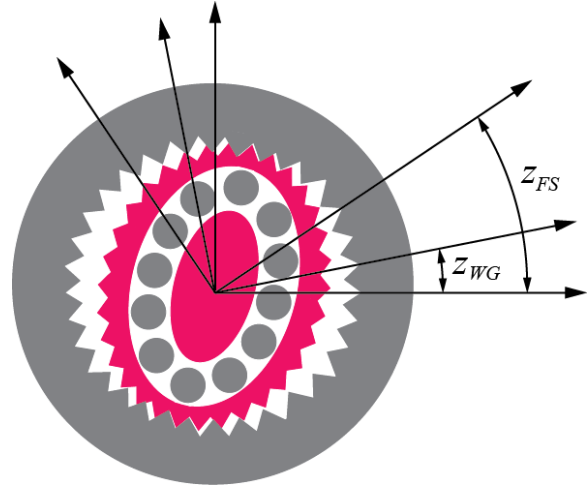


Figura 4. Detalle de transmisión HD

Las relaciones cinemáticas y dinámicas entre los desplazamientos angulares y torques de cada componente del sistema HD están definida por las siguientes expresiones

$$\theta_{WG} = (N+1)\theta_{CS} - N\theta_{FS} \quad (23)$$

$$T_{WG} = 1/(N+1)T_{CS} = -1/N T_{FS} \quad (24)$$

donde N es la relación de transmisión, θ es el ángulo de rotación del elemento correspondiente de la transmisión HD y T es el torque.

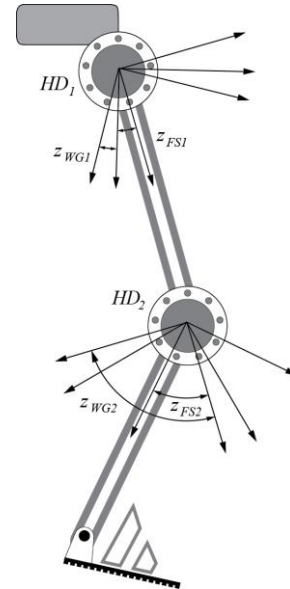


Figura 5. Esquema en 2D de exoesqueleto con transmisión HD en cadera y rodilla

El exoesqueleto de la Figura 5 con actuación en la cadera y rodilla representa un sistema de cadena cerrada debido a la interconexión entre los tres elementos que componen cada transmisión HD. Si

designamos al CS como el elemento padre del WG y del FS y consideramos el sistema local de coordenadas fijo al CS, la restricción cinemática de la ecuación (23) se puede expresar en coordenadas relativas z como sigue

$$\Phi(z) = z_{WG} + Nz_{FS} = 0 \quad (25)$$

Cuando las restricciones se expresan en función de coordenadas globales, como es el caso de las coordenadas naturales, la matriz R_z debe obtenerse generalmente en forma numérica en cada paso de integración. En el caso de la restricción del sistema HD como indica la ecuación (25), la relación entre las coordenadas relativas se mantiene constante, dependiendo solamente de la relación de transmisión N . De esta forma, el cierre de la cadena cinemática del sistema HD puede hacerse muy fácilmente y de una forma eficiente. Considerando entonces las coordenadas relativas del elemento WG z_{WG1} y z_{WG2} como independientes, las velocidades relativas del sistema de la Figura 5 pueden expresarse como una función de las independientes según la siguiente expresión

$$\begin{Bmatrix} \dot{z}_{FS1} \\ \dot{z}_{WG1} \\ \dot{z}_{FS2} \\ \dot{z}_{WG2} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/N & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & -1/N \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{z}_{WG1} \\ \dot{z}_{WG2} \end{Bmatrix}; \quad (26)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} -1/N & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & -1/N \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Derivando con respecto al tiempo la ecuación (26) se obtienen las aceleraciones relativas. Como puede observarse la matriz R_z es constante, por lo que \dot{R}_z es cero. De esta forma la ecuación (22), que representa la ecuación del movimiento del sistema de cadena cerrada pierde el último término del lado derecho, quedando expresada como

$$R_z^T R_d^T M^{\Sigma} R_d R_z \ddot{z}^i = R_z^T \tau + R_z^T R_d^T Q^{\Sigma} - R_z^T R_d^T T^{\Sigma} M^{\Sigma} R_d \dot{z} \quad (27)$$

donde los toques de la ecuación (24) pueden incluirse fácilmente dentro del término que representa los torques externos τ . Aunque se ha introducido un modelo ideal de transmisión HD, también pueden incluirse efectos adicionales como la rigidez, viscosidad torsional y la histéresis relacionada con estos sistemas.

3 IMPLEMENTACIÓN

Debido al incremento de par generado por la transmisión HD, el sistema no es backdriveable. Es importante remarcar que esta característica no podría simularse con un par R ordinario, y este efecto sería más difícil de incluir para describir más fielmente el funcionamiento del sistema. Esta característica además se hace especialmente importante para simular controles de impedancia y/o admitancia, con la finalidad de hacer más transparente el exoesqueleto para el usuario.

La formulación topológica con la inclusión de la transmisión HD descrita en el apartado anterior se ha implementado en Simulink®. Esto tiene la ventaja de que las simulaciones se realizan en un entorno preparado para sistemas multidominio y especialmente desarrollado para el diseño de algoritmos de control.

Con el objetivo de mostrar el funcionamiento de la formulación topológica adaptada con la inclusión de restricciones dinámicas y cinemáticas de los sistemas de transmisión HD, se ha implementado un ejemplo de control de posición a un modelo de exoesqueleto como el de la Figura 5. El diagrama de bloques de este sistema puede verse en la Figura 6

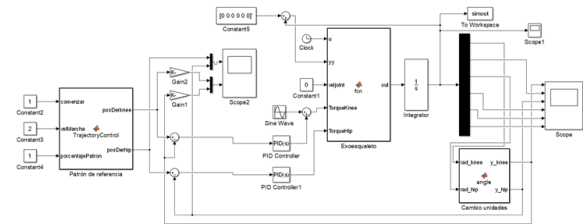


Figura 6. Diagrama de bloques del modelo de exoesqueleto.

El control de posición se aplica al movimiento de la cadera y de la rodilla, utilizando para ello trayectorias preestablecidas basadas en modelos de marcha normal. En la Figura 7 puede verse la trayectoria de referencia de cada una de las articulaciones del exoesqueleto y la trayectoria seguida al aplicar un control PID a cada articulación.

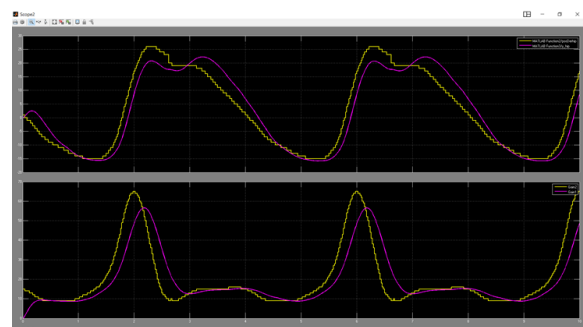


Figura 7. Trayectorias de la cadera y rodilla durante el control de posición.

Adicionalmente, en la Figura 8 puede verse una gráfica con los valores del vector de estado completo, formado por los cuatro desplazamientos angulares del sistema y sus dos velocidades angulares independientes.

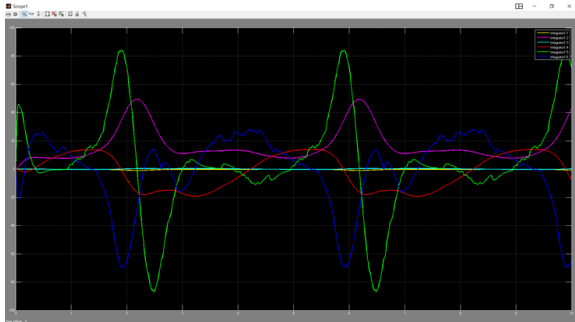


Figura 8. Valores del vector de estado del sistema.

Referencias

- [1] J. García de Jalón and E. Bayo, *Kinematic and dynamic simulation of multibody systems: the real-time challenge*. Springer-Verlag, 1994.
- [2] A. F. Hidalgo and J. García de Jalón, "Implementación eficiente de una formulación semirrecursiva para la dinámica de sistemas multicuerpo de gran tamaño," *Rev. Int. Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ing.*, vol. 29, no. 4, pp. 225–233, Oct. 2013.
- [3] L. Lemmer and B. Kiss, "Modeling, Identification, and Control of Harmonic Drives for Mobile Vehicles," in *2006 IEEE International Conference on Mechatronics*, 2006, pp. 369–374.
- [4] D. Negrut, R. Serban, and F. A. Potra, "A Topology-Based Approach to Exploiting Sparsity in Multibody Dynamics: Joint Formulation*," *Mech. Struct. Mach.*, vol. 25, no. 2, pp. 221–241, Jan. 1997.
- [5] C. Preissner, "A high-fidelity harmonic drive model: Experiment, simulation, and application," University of Illinois at Chicago, 2009.
- [6] J. I. Rodríguez, J. M. Jiménez, F. J. Funes, and J. García de Jalón, "Recursive and Residual Algorithms for the Efficient Numerical Integration of Multi-Body Systems," *Multibody Syst. Dyn.*, vol. 11, no. 4, pp. 295–320, May 2004.
- [7] Serna, R. Avilés, and J. García de Jalón, "Dynamic analysis of plane mechanisms with lower pairs in basic coordinates.," *Mech. Mach. Theory*, vol. 17, 1982.
- [8] H. D. Taghirad and P. R. Bélanger, "Modeling and Parameter Identification of Harmonic Drive Systems," *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 120, no. 4, p. 439, 1998.
- [9] R. A. Wehage and E. J. Haug, "Generalized Coordinate Partitioning for Dimension Reduction in Analysis of Constrained Dynamic Systems," *J. Mech. Des.*, vol. 104, no. 1, p. 247, Jan. 1982.

IDENTIFICACIÓN DE CONTRACCIONES ISOMÉTRICAS DE LA EXTREMIDAD SUPERIOR EN PACIENTES CON LESIÓN MEDULAR INCOMPLETA MEDIANTE CARACTERÍSTICAS ESPECTRALES DE LA ELECTROMIOGRAFÍA DE ALTA DENSIDAD (HD-EMG)

Mislav Jordanić

Departamento de Ingeniería de Sistemas, Automática e Informática Industrial (ESAI), Centre de Recerca en Enginyeria Biomèdica (CREB), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Centro de Investigación Biomédica en Red en Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina (CIBER-BBN), Barcelona, España

Mónica Rojas-Martínez

Departamento de Bioingeniería, Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia
Centro de Investigación Biomédica en Red en Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina (CIBER-BBN), Departamento de Ingeniería de Sistemas, Automática e Informática Industrial (ESAI), Centre de Recerca en Enginyeria Biomèdica (CREB), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, España

Joan Francesc Alonso

Departamento de Ingeniería de Sistemas, Automática e Informática Industrial (ESAI), Centre de Recerca en Enginyeria Biomèdica (CREB), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Centro de Investigación Biomédica en Red en Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina (CIBER-BBN), Barcelona, España

Carolina Migliorelli

Centro de Investigación Biomédica en Red en Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina (CIBER-BBN), Departamento de Ingeniería de Sistemas, Automática e Informática Industrial (ESAI), Centre de Recerca en Enginyeria Biomèdica (CREB), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, España

Miguel Ángel Mañanas

Departamento de Ingeniería de Sistemas, Automática e Informática Industrial (ESAI), Centre de Recerca en Enginyeria Biomèdica (CREB), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Centro de Investigación Biomédica en Red en Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina (CIBER-BBN), Barcelona, España

Resumen

La actividad mioeléctrica puede ser utilizada para la identificación de tareas motoras. En este estudio se investigaron diferentes características frecuenciales para la identificación de cuatro tareas motoras de la extremidad superior (flexión, extensión, supinación, y pronación) en pacientes con lesión medular incompleta. También se evaluaron los niveles de esfuerzo y la identificación de las tareas durante fatiga. Aunque se obtuvieron buenos resultados, las características frecuenciales mostraron su utilidad únicamente para la identificación de tareas, mientras que no aportaron información adecuada para la identificación de los niveles de esfuerzo o la identificación durante un ejercicio de fatiga.

Palabras Clave: lesión medular incompleta, control mioeléctrico, EMG de alta densidad, HD-EMG, reconocimiento de patrones, rehabilitación.

1 INTRODUCCIÓN

La electromiografía de superficie (EMG) consiste en el registro no invasivo de la actividad mioeléctrica mediante electrodos colocados en la superficie de la piel. Las señales registradas mediante esta técnica se componen de potenciales de acción que viajan a lo largo de las fibras musculares durante la contracción, y es directamente proporcional a los impulsos neuronales que hacen que se disparen. En consecuencia, la señal EMG contiene información neuromuscular valiosa que puede usarse para la evaluación de las estrategias de control de las tareas motoras [1].

Aunque la comunidad académica ha estudiado ampliamente este enfoque durante las últimas décadas, se trata todavía de un problema pendiente de solución. Los sistemas disponibles comercialmente más habituales utilizan métodos basados en umbrales [2]. Mediante señales EMG de dos músculos (habitualmente un par agonista-antagonista) se mide la intensidad de la contracción, y cuando un músculo

supera el umbral se produce el movimiento en una dirección. Si se supera en el otro músculo, el movimiento se produce en dirección contraria. Esta estrategia puede controlar únicamente un grado de libertad, de manera que si se desea controlar una prótesis con varios grados de libertad, el usuario debe cambiar entre ellos mediante un conmutador o la coactivación de ambos músculos [3].

A lo largo de los años, se han realizado grandes e importantes mejoras en los mecanismos de control protésico y los enfoques basados en el reconocimiento de patrones han pasado a considerarse tecnología de vanguardia [4]. Mediante el reconocimiento de patrones, las tareas asociadas a cualquier grado de libertad se pueden activar en cualquier instante, sin necesidad de seleccionar manualmente uno de ellos como activo. Existe cierto consenso en el hecho que el clasificador utilizado no es demasiado importante para la identificación de las tareas, y por eso se prefieren clasificadores sencillos y rápidos como el análisis discriminante lineal (LDA, por sus siglas en inglés) [4]. Por otro lado, la selección de características con las que clasificar estas tareas es todavía materia de debate. Principalmente se utilizan características derivadas del análisis en el dominio del tiempo, puesto que son sencillas y ofrecen un buen rendimiento, pero algunos autores también sugieren el uso de variables obtenidas en el dominio frecuencial o tiempo-frecuencia [5].

De manera alternativa, recientemente se ha propuesto el uso de características espaciales obtenidas mediante electromiografía de alta densidad (HD-EMG) en sujetos sanos [6][7] y también en pacientes con lesión medular incompleta [8][9]. La HD-EMG consiste en un registro multicanal de electromiografía en el que los electrodos se distribuyen en una cuadrícula bidimensional, de manera que se obtiene más información sobre la actividad mioeléctrica [10]. Este artículo investiga la combinación de variables de intensidad y frecuencia obtenidas de la HD-EMG como características para la identificación de tareas motoras en pacientes con lesión medular incompleta. Estos pacientes realizaron cuatro tareas motoras de la extremidad superior (flexión y extensión, y supinación y pronación del antebrazo) a tres niveles de esfuerzo diferentes mientras se registraba la HD-EMG sobre cinco músculos involucrados en esas tareas: *biceps brachii*, *triceps brachii*, *brachioradialis*, *anconeus*, y *pronator teres*. Se calculó la intensidad para cada músculo como el logaritmo del valor cuadrático medio promedio de todos los canales que registraron su actividad. Dos medidas frecuenciales, habituales en la literatura, fueron calculadas para cada músculo: la frecuencia media promedio y la frecuencia mediana promedio. La primera se obtuvo mediante el promedio de la frecuencia media de cada canal relacionado con el

músculo estudiado, y la segunda mediante el promediado de la frecuencia mediana.

Se evaluaron las combinaciones resultantes de utilizar intensidades y frecuencias medias o intensidades y frecuencias medianas como características para la identificación de tareas y también para la identificación de niveles de esfuerzo. Además, el rendimiento de estas características se evaluó durante pruebas de fatiga. Los resultados obtenidos se compararon con los obtenidos únicamente con las características de intensidad.

2 METODOLOGÍA

Diez pacientes con lesión medular incompleta (edad: 44 ± 19 años; altura 167 ± 9 cm; peso: 76 ± 11 kg), y valorados C o D en la escala ASIA, fueron seleccionados para el experimento.

Los sujetos realizaron las pruebas sentados con la espalda recta delante de una mesa, con su brazo dominante anclado a la altura de la muñeca mediante un brazo mecánico.

Para el registro, se usaron tres matrices de electrodos de fabricación propia. Fueron diseñados con ojales de plata insertados en tejido no conductor, formando cuadrículas con una distancia entre electrodos de 10 mm. Dos de las matrices (6 filas por 12 columnas cada una) se colocaron sobre el brazo, una cubriendo el *biceps brachii* y la otra el *triceps brachii*. Una tercera matriz (6 filas por 16 columnas) se colocó en el antebrazo, cubriendo el *anconeus*, el *pronator teres*, y el *brachioradialis*. Una vez colocadas las matrices de sensores, se aplicó gel conductor en cada electrodo a través de la abertura del ojal.

Se registraron señales monopares de HD-EMG usando dos amplificadores de electromiografía de 128 canales disponibles comercialmente (LISIN-OT Bioelettronica) usando una frecuencia de muestreo de 2048 Hz, un filtro paso banda entre 10 y 750 Hz, y un convertidor analógico digital de 12 bits. Además de las señales bioeléctricas, el par de fuerzas ejercido se midió en ambos lados del brazo mecánica usando sendos sensores de torsión (OT Bioelettronica, rango de 150 Nm).

En el experimento, los pacientes realizaron cuatro ejercicios isométricos diferentes con la extremidad superior a tres niveles de esfuerzo, concretamente: flexión, extensión, supinación, y pronación del antebrazo a un 10%, 30% y 50% de la máxima contracción voluntaria (MCV). Dicha MCV fue obtenida al principio del protocolo de registro mediante el cálculo de la máxima contracción medida tras tres intentos consecutivos. Durante cada una de las medidas, se mostraba a los sujetos el par de torsión en una pantalla a modo de realimentación visual.

Las contracciones voluntarias submáximas del protocolo de registro fueron ejecutadas de manera aleatoria con respecto a la tarea y el nivel de

esfuerzo. Cada una de las medidas consistió en mantener la contracción durante 10 segundos al nivel deseado, y se realizaron descansos de tres minutos entre medidas consecutivas para evitar la aparición de fatiga. Finalmente, los sujetos realizaron la prueba de resistencia en la que cada una de las tareas se ejecutó al 50% de la MCV hasta que no se pudo mantener la contracción a causa de la fatiga. El protocolo de registro y los equipos de medida fueron previamente descritos en [9].

2.2 EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS

Las señales HD-EMG se filtraron usando un filtro paso banda Butterworth de 4° orden, con frecuencias de corte de 15 y 350 Hz. Siguiendo el procedimiento descrito en [11], se identificaron los canales con artefactos y se generaron y segmentaron los mapas de activación de intensidad. De esta manera, únicamente se conservaron los canales correspondientes a los músculos de interés para su análisis posterior.

Se tuvieron en cuenta tres medidas para la clasificación:

- Intensidad
- Frecuencia media
- Frecuencia mediana

Se calculó la intensidad (Int_n) como el valor cuadrático medio de la señal EMG (emg_n) registrada en el canal n , mientras que las frecuencias media (MNF_n) y mediana (MDF_n) se obtuvieron como las frecuencias media y mediana del canal n , respectivamente:

$$Int_n = RMS(emg_n) \quad (1)$$

$$MNF_n = \frac{\int_{15Hz}^{350Hz} f \cdot P_n(f) df}{\int_{15Hz}^{350Hz} P_n(f) df} \quad (2)$$

$$MDF_n = \int_{15Hz}^{350Hz} P_n(f) df = \int_{MDF_n}^{350Hz} P_n(f) df \quad (3)$$

, donde P_n es la densidad espectral de potencia de la señal EMG (emg_n) estimada mediante el periodograma de Welch.

A continuación, se promediaron estos valores para todos los canales correspondientes a un musculo específico para obtener una única medida para cada uno de los cinco músculos estudiados: intensidad promedio (I), frecuencia media promedio (Fmean), y frecuencia mediana promedio (Fmedian):

$$I = \log_{10} \frac{1}{N} \sum_n Int_n \quad (4)$$

$$Fmean = \frac{1}{N} \sum_n MNF_n \quad (5)$$

$$Fmedian = \frac{1}{N} \sum_n MDF_n \quad (6)$$

Nótese que se usó el logaritmo de la intensidad media para resolver el problema de no linealidad, como se ha sugerido en estudios previos [6][7][8][9].

Las características utilizadas para la identificación del movimiento fueron combinaciones de las medidas descritas anteriormente: solamente la intensidad promedio (I), la combinación de intensidad promedio y frecuencia media promedio (I+Fmean), y la combinación de intensidad promedio y frecuencia mediana promedio (I+Fmedian).

La identificación de las tareas (4 clases) y la identificación de tareas y niveles de esfuerzo (12 clases) fue realizada mediante un LDA. El conjunto de datos fue dividido en dos, un conjunto de entrenamiento y uno de prueba, usando muestreo estratificado y una ratio de 70%-30%. Para prevenir el error estadístico de tipo 3, se usó validación cruzada repitiendo este muestreo estratificado (*repeated holdout*) [12]. Los resultados se expresaron en base a sensibilidad (S) y precisión (P):

$$S = \frac{VP}{VP + FN} \quad (7)$$

$$P = \frac{VP}{VP + FP} \quad (8)$$

, donde VP indica los verdaderos positivos, FN los falsos negativos, y FP los falsos positivos [9].

Adicionalmente, se evaluó el efecto de la fatiga en la identificación de tareas usando las pruebas de resistencia registradas al final del protocolo, dividiendo cada prueba en 5 segmentos de la misma longitud. El clasificador se entrenó usando el primero de ellos, y se evaluó usando los cinco segmentos disponibles.

2 RESULTADOS

Las tablas 1 y 2 muestran los resultados de la identificación de tareas y de tareas y niveles de esfuerzo, respectivamente. Puede observarse que al añadir las características frecuenciales a las de intensidad, los resultados superan a los obtenidos cuando la identificación se realiza únicamente con la intensidad. I+Fmean supera de manera significativa los otros dos conjuntos de características ($p < 0.05$) e I+Fmedian también es significativamente superior a I, tanto en la identificación de tareas como de tareas y niveles de esfuerzo.

Tabla 1: Identificación de tareas

Características	Sensibilidad (%)	Precisión (%)
I	93.8 ± 5.1	94.2 ± 5.0
I+Fmedian	94.7 ± 4.7	95.0 ± 4.6
I+Fmean	95.5 ± 4.2	95.7 ± 4.0

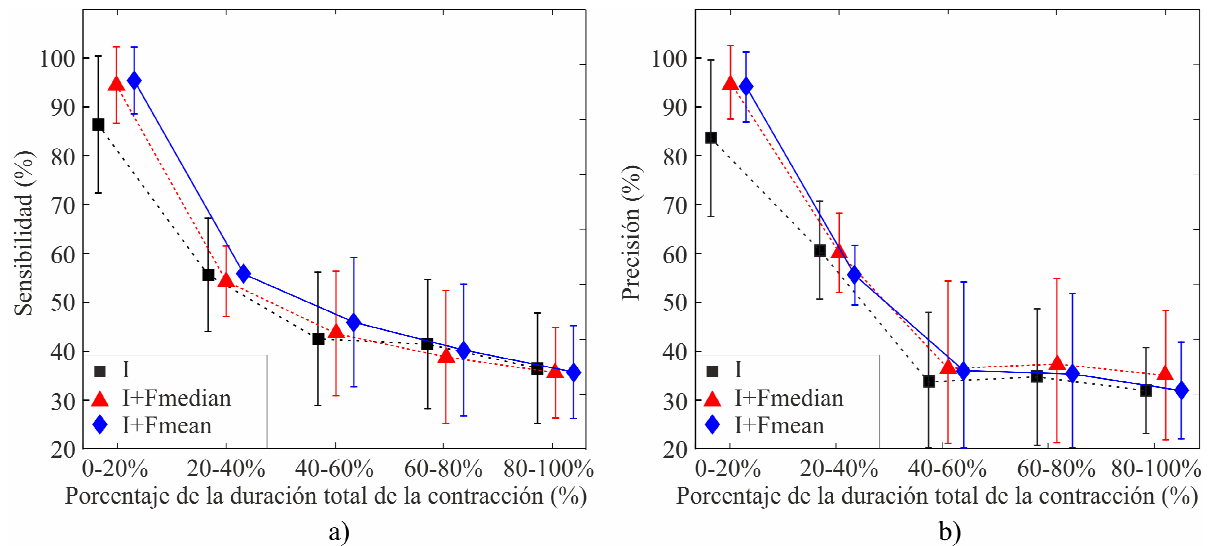


Figura 1: Sensibilidad (a) y precisión (b) de la identificación de tareas durante la prueba de fatiga usando los conjuntos de características I, I+Fmedian, y I+Fmean.

Tabla 2: Identificación de tareas y niveles de esfuerzo

Características	Sensibilidad (%)	Precisión (%)
I	85.3 ± 5.3	86.8 ± 5.2
I+Fmedian	86.3 ± 5.7	87.8 ± 5.4
I+Fmean	87.4 ± 5.5	88.7 ± 5.3

Para analizar más en detalle la capacidad del clasificador de discriminar entre niveles de esfuerzo específicos, se realizaron pruebas adicionales: se identificó el nivel de esfuerzo para cada tarea separadamente. Esto conllevó el uso de cuatro clasificadores diferentes, uno para cada tarea, para identificar tres niveles de esfuerzo. Solamente se utilizaron las características relacionadas con los pares de músculos agonistas y antagonistas, tal y como se describe en [6]: *biceps brachii* y *triceps brachii* para flexión y extensión, *biceps brachii*, *brachioradialis*, y *anconeus* para supinación, y *anconeus* y *pronator teres* para pronación. Los resultados de este análisis se muestran en las tablas 3 y 4. Mientras que con la flexión y la pronación no se observan diferencias significativas entre los conjuntos de características, con la extensión I+Fmean supera significativamente a I, y con la supinación I+Fmean supera de manera significativa a los otros dos conjuntos.

Tabla 3: Sensibilidad promedio en la identificación de niveles de esfuerzo

Tarea	I (%)	I+Fmedian (%)	I+Fmean (%)
Flexión	88.6 ± 9.8	87.9 ± 10.7	88.1 ± 10.8
Extensión	80.5 ± 13.2	82.0 ± 12.6	82.4 ± 12.1
Supinación	85.0 ± 11.7	87.0 ± 9.9	88.9 ± 9.2
Pronación	73.9 ± 8.2	73.7 ± 10.3	73.3 ± 10.2

Tabla 4: Precisión promedio en la identificación de niveles de esfuerzo

Tarea	I (%)	I+Fmedian (%)	I+Fmean (%)
Flexión	89.8 ± 9.3	89.0 ± 10.2	89.2 ± 10.1
Extensión	81.6 ± 13.6	83.2 ± 12.6	83.8 ± 11.7
Supinación	86.4 ± 11.2	87.8 ± 9.9	89.8 ± 8.9
Pronación	75.4 ± 9.1	75.8 ± 10.7	75.5 ± 10.1

Los resultados de la identificación de tareas durante fatiga se muestran en la figura 1. Únicamente se encontraron diferencias significativas durante el primer tramo (20%) del tiempo total de registro.

3 DISCUSIÓN

Este trabajo evalúa el uso de características frecuenciales calculadas a partir de la HD-EMG para la identificación de tareas motoras en la extremidad superior en pacientes con lesión medular incompleta. Se tuvieron en cuenta la frecuencia media y la frecuencia mediana en combinación con el valor cuadrático medio de la señal mioeléctrica. Un clasificador lineal sencillo y rápido (LDA) fue usado para identificar tareas y niveles de esfuerzo.

Los resultados demuestran que la identificación de tareas y de tareas y niveles de esfuerzo se puede beneficiar significativamente de la incorporación de características frecuenciales, especialmente la frecuencia media (I+Fmean). Por otro lado, al identificar el nivel de esfuerzo en tareas específicas, no ofrecieron resultados superiores en flexión o pronación, pero durante extensión y supinación I+Fmean mejoró significativamente la identificación. Al examinar la robustez de la combinación de intensidad y características frecuenciales ante fatiga

muscular, únicamente se encontraron diferencias entre los diferentes conjuntos de características al inicio de la prueba, cuando el efecto de la fatiga es mínimo. Este resultado puede explicarse por el hecho de que la frecuencia de la señal EMG se ve enormemente afectada por la fatiga [13]. De hecho, la frecuencia media y la frecuencia mediana son medidas utilizadas habitualmente para cuantificar y monitorizar la fatiga muscular [14]. Puesto que hay un cambio evidente en la frecuencia debido a la fatiga, estas medidas no consiguen ser efectivas para la identificación de tareas, ya que se trata de una aplicación en la cual las características deberían ser robustas e independientes de la fatiga.

Como extensiones futuras de este trabajo, sería interesante analizar la distribución espacial de la frecuencia en los músculos. Las características extraídas de este tipo de información podrían ser útiles en la identificación de tareas puesto que ya se ha demostrado que la distribución espacial de intensidad mejora los resultados.

Además, la distribución espacial de frecuencia podría proporcionar información sobre el tipo y la localización de fibras musculares en el músculo, ayudando a entender la influencia de la lesión sobre las estrategias de reclutamiento de fibras musculares específicas. Esto sería de gran ayuda para entender este tipo de lesiones y podría jugar un papel importante en la planificación de la terapia de rehabilitación.

Finalmente, dado que la frecuencia del EMG es un indicador importante de la fatiga muscular, la distribución espacial de la frecuencia podría usarse para monitorizar la fatiga y como información para los terapeutas durante el diagnóstico y la terapia. Por otro lado, en control de prótesis podría aportar información adicional para ajustar y adaptar el clasificador y así incrementar su robustez.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los doctores Úrsula Costa y Josep Medina del Servicio de Rehabilitación Funcional del Hospital de Neurorehabilitación Institut Guttmann su colaboración en el reclutamiento de pacientes y el soporte clínico durante el desarrollo de los experimentos. Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el MINECO de España (DPI2014-59049-R) y por una beca de formación de investigadores (FI 2014) de AGAUR, Generalitat de Catalunya, España.

Referencias

- [1] R. Merletti and P. (Philip A. . Parker, *Electromyography : physiology, engineering, and noninvasive applications*. Wiley-IEEE Press, 2004.
- [2] P. A. Parker and R. N. Scott, "Myoelectric control of prostheses," *Crit. Rev. Biomed. Eng.*, vol. 13, no. 4, pp. 283–310, 1986.
- [3] D. Farina, R. Merletti, and R. M. Enoka, "The extraction of neural strategies from the surface EMG: an update.," *J. Appl. Physiol.*, vol. 117, no. 11, pp. 1215–30, Dec. 2014.
- [4] M. Hakonen, H. Piitulainen, and A. Visala, "Current state of digital signal processing in myoelectric interfaces and related applications," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 18, pp. 334–359, 2015.
- [5] M. A. Oskoei and H. Hu, "Myoelectric control systems-A survey," *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 2, no. 4, pp. 275–294, 2007.
- [6] M. Rojas-Martínez, M. a. Mañanas, J. F. Alonso, and R. Merletti, "Identification of isometric contractions based on High Density EMG maps," *J. Electromyogr. Kinesiol.*, vol. 23, no. 1, pp. 33–42, 2013.
- [7] M. Jordanić, M. Rojas-Martínez, M. A. Mañanas, J. F. Alonso, and H. R. Marateb, "A novel spatial feature for the identification of motor tasks using HD-EMG," *Sensors*, vol. Submitted , 2017.
- [8] M. Jordanic, M. Rojas-Martínez, M. A. Mañanas, and J. F. Alonso, "Spatial distribution of HD-EMG improves identification of task and force in patients with incomplete spinal cord injury," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 13, no. 1, p. 41, 2016.
- [9] M. Jordanić, M. Rojas-Martínez, M. A. Mañanas, and J. F. Alonso, "Prediction of isometric motor tasks and effort levels based on high-density EMG in patients with incomplete spinal cord injury," *J. Neural Eng.*, vol. 13, no. 4, p. 046002, 2016.
- [10] R. Merletti, A. Botter, A. Troiano, E. Merlo, and M. A. Minetto, "Technology and instrumentation for detection and conditioning of the surface electromyographic signal: State of the art," *Clin. Biomech.*, vol. 24, no. 2, pp. 122–134, 2009.
- [11] M. Rojas-Martínez, M. a Mañanas, and J. F. Alonso, "High-density surface EMG maps from upper-arm and forearm muscles.," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 9, p. 85, Jan. 2012.
- [12] F. Mosteller, "A k-Sample Slippage Test for an Extreme Population on JSTOR," *Ann. Math. Stat.*, vol. 19, no. 1, pp. 58–65, 1948.

- [13] N. K. Vøllestad, “Measurement of human muscle fatigue,” *J. Neurosci. Methods*, vol. 74, no. 2, pp. 219–227, 1997.
- [14] H. Hermens and B. Freriks, *SENIAM 9: European Recommendations for Surface ElectroMyoGraphy, results of the SENIAM project (CD)*. Roessingh Research and Development, 1999.

Diseño de una plataforma para analizar el efecto de la estimulación mecánica aferente en el temblor de pacientes con temblor esencial

Julio Salvador Lora Millán¹

¹Centro de Automática y Robótica (CAR-CSIC), Crta. Campo Real Km 0.200 Arganda del Rey (Madrid), julio.lora@csic.es

Roberto López Blanco², Jesús González de la Aleja², Eduardo Rocon de Lima¹

²Instituto de investigación Hospital Universitario 12 de Octubre (i+12), Av de Córdoba s/n (Madrid)

Resumen

Este documento describe una plataforma para analizar los efectos de la estimulación mecánica aferente en pacientes con Temblor Esencial (TE). El temblor esencial es una enfermedad caracterizada por provocar temblor bilateral, cinético y postural en antebrazos y manos del paciente. El propósito de la plataforma descrita es esclarecer el papel que juegan determinadas estructuras cerebrales en la génesis del temblor. Para ello se utilizan estimuladores piezoeléctricos capaces de generar una vibración mecánica controlada que estimule los corpúsculos de Paccini del paciente, así como sensores inerciales encargados de monitorizar los efectos que tiene esta estimulación en el temblor de los pacientes. El protocolo propuesto para seguir en los ensayos experimentales, así como el análisis de datos posterior son descritos también en este documento.

Palabras Clave: Estimulación Mecánica Aferente, Temblor esencial, Sensor Inercial, Estimulador Piezoeléctrico.

1 INTRODUCCIÓN

El temblor esencial (TE) se considera una enfermedad neurodegenerativa [1] aunque su origen es incierto. Afecta aproximadamente al 5% de la población de más de 65 años [2], considerándose el trastorno de movimiento más común en adultos [3]. El TE se caracteriza por provocar temblor bilateral, simétrico, cinético y postural en las manos y antebrazos del paciente, en algunas ocasiones puede ir acompañado por temblor cefálico [4]. El 75% de los pacientes de TE encuentran que esta enfermedad interfiere de manera significativa en sus vidas [5], concretamente en sus actividades diarias, su empleo y sus relaciones sociales[6].

Los procesos patofisiológicos que intervienen en la génesis del temblor son mayormente especulativos, aunque muchos estudios coinciden en que se encuentra involucrado el siguiente circuito neuronal: la oliva inferior, el cerebelo, el tálamo (núcleo ventral intermedio) y el cortex motor [7], [8]. Recientes estudios post-mortem han demostrado la pérdida de células Purkinje en pacientes con TE [9],

sugiriendo que el TE está directamente relacionado con disfunción cerebelosa [10]. Así mismo también hay indicios de que las estructuras cerebrales implicadas en la generación, transmisión y mantenimiento del TE son las redes olivo-cerebelar y talamocortical [11].

Recientes experimentos consistentes en la estimulación aferente mediante estimulación eléctrica transcutánea han conseguido una reducción significativa del temblor de forma transitoria en varios pacientes [12]. Este descubrimiento está en concordancia con un reciente trabajo sobre la restauración de la locomoción en roedores modelos de la enfermedad de Parkinson mediante la estimulación de la medula espinal [13]. Además, numerosas evidencias sustentan la idea de que la estimulación de las vías aferentes puede aliviar los síntomas del temblor [14]. Todas estas conclusiones por tanto podrían indicar que las manifestaciones del temblor se ven afectadas por la estimulación aferente.

Siguiendo esta línea, la plataforma y el protocolo experimental expuestos en este documento pretenden analizar los efectos sobre el temblor al generar estimulación aferente a través de la estimulación de los mecanorreceptores de la piel. La hipótesis de que el temblor se vea afectado por la estimulación mecánica aferente está sustentada por el hecho de que existen fuertes neuronas inhibitorias (GABAérgicas) en el núcleo cuneiforme proyectando al núcleo olivar inferior. Además, la estimulación eléctrica del núcleo cuneiforme en gatos ha demostrado la disminución de la actividad en el núcleo olivar inferior [15].

Los mecanorreceptores son receptores sensoriales que responden a la presión mecánica, activándose por una deformación debida a tacto, presión, estiramiento o vibración de la piel [16]. Existen cuatro tipos principales de mecanorreceptores: corpúsculos de Paccini, corpúsculos de Meissner, discos de Merkel y terminaciones de Ruffini. La capacidad de detectar la vibración cutánea depende de dos de estos mecanorreceptores: los corpúsculos de Paccini son los encargados de detectar las altas frecuencias (80-450Hz) mientras que los corpúsculos de Meissner son los responsables de la detección de bajas

frecuencias (10-80Hz) [17]. Cuando son estimulados, los mecanorreceptores transmiten la información sensorial hasta el núcleo cuneiforme ipsilateral [17]. Algunos estudios sugieren que la fuente dominante de la inhibición inducida por la estimulación mecánica aferente procede de los corpúsculos de Paccini [16].

La plataforma que se propone en este documento se basa en actuadores piezoeléctricos capaces de producir una vibración mecánica controlada. Para evaluar los efectos sobre el temblor, se utilizan sensores inerciales que miden el movimiento de la articulación afectada, tal y como ya se ha hecho en estudios previos [12], [18], [19]. Así mismo, en este documento se detalla el protocolo a seguir durante los ensayos experimentales, monitorizando al paciente con y sin estimulación, de cara a comparar los resultados obtenidos y determinar los efectos de la estimulación mecánica aferente sobre las métricas del temblor.

2 COMPONENTES DEL SISTEMA

El sistema desarrollado está compuesto por los siguientes componentes (Figura 1): tres tipos diferentes de actuadores piezoeléctricos (QP-10W, PPA-4011 y PPA-1022, Mide Technology, US) con sus respectivos controladores (DRV8662, Texas Instruments, US), una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) (NI USB 6003, National Instruments, US), un sistema comercial de medida inercial de movimientos (TechMCS, Technaid, ES), y un ordenador estándar (Interl Core i7 a 2.2GHz).

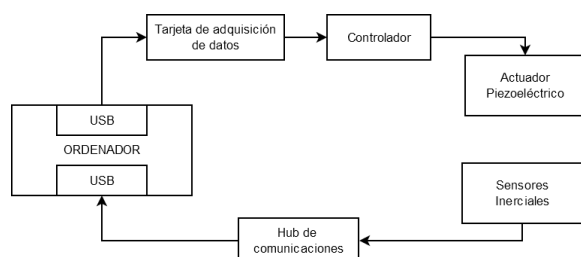


Figura 1: Componentes del sistema: 1) Sensores inerciales, 2) Hub de comunicaciones, 3) Ordenador estándar con software de gestión de la plataforma, 4) Tarjeta de adquisición de datos, 5) Controladores para piezoeléctricos, 6) Actuadores piezoeléctricos.

Tres diferentes tipos de actuadores se han seleccionados para adecuar su tamaño a la forma del área que ha de estimular (38.1mm x 50.8mm para el antebrazo, 71.0mm x 25.4mm para la palma de la mano y 53.00x10.3mm para el pulpejo de los dedos). Estos vibradores cerámicos son capaces de cambiar de forma y grosor en función de la tensión que se aplique en sus bornes, así se generan vibraciones mecánicas de la misma frecuencia que las señales de control generadas por el DAQ y amplificadas por los

controladores. Las señales de control son muestreadas a 5kHz, además son totalmente configurables en amplitud y frecuencia, pudiendo llegar hasta los 100V y 450Hz respectivamente. El DAQ se comunica con el ordenador a través de un puerto USB para controlar y monitorizar los parámetros de estimulación (frecuencia y amplitud).

Para medir la repercusión de la estimulación en el temblor de los pacientes se utilizan dos sensores inerciales colocados en la palma de la mano y el antebrazo respectivamente. De esta forma, es posible medir la velocidad angular tridimensional de cada segmento. Un *hub* de comunicaciones es el encargado de configurar y adquirir los datos provenientes de los sensores a una frecuencia de 100Hz.

3 CONTROL DE LA PLATAFORMA

En cuanto al proceso de monitorización, los parámetros de la estimulación y las velocidades angulares son almacenadas simultáneamente, asignando a cada paquete de datos una misma marca temporal.

En lo relativo al control de la plataforma, el sistema puede ser controlado manualmente o siguiendo tres diferentes modos de operación predefinidos. En el primer caso, el operario es el encargado de configurar el inicio y fin del proceso, así como de iniciar y finalizar la estimulación y configurar la amplitud y la frecuencia de las ondas senoidales generadas que actúan como señales de control.

En cuanto a los modos de operación predefinidos, el proceso de monitorización y control del estímulo están sincronizados, comenzando la grabación de datos al inicio del protocolo y finalizando automáticamente una vez que el protocolo termina. Estos modos de operación siempre siguen una estructura común: 1) No estimulación durante T_{NE} segundos; 2) Estimulación durante T_E segundos; 3) No estimulación durante T_{NE} segundos. Los tiempo de estimulación y no estimulación (T_E y T_{NE} respectivamente) son configurables por el operario.

Los modos de operación predefinidos utilizan durante la estimulación una amplitud constante y definida por el operario. No obstante la frecuencia de estimulación difiere en función del modo de operación:

- Estimulación normal: el actuador piezoeléctrico es excitado a una única frecuencia definida por el operario.
- Estimulación creciente: el operario define las frecuencias máxima y mínima así como el intervalo entre frecuencias. La frecuencia de la señal de control aumenta desde la

mínima hasta la máxima a intervalos constantes.

- Estimulación aleatoria: al igual que el caso anterior, el operario define las frecuencias máxima y mínima y el intervalo entre frecuencias. Las frecuencias de la señal de control son las mismas que en el caso anterior pero siguiendo un orden aleatorio.

A pesar de los cambios que se producen en la frecuencia de estimulación a los largo del tiempo, en todo instante todos los actuadores estimulan a la misma frecuencia. Por otro lado, dentro de cada modo de operación, la señal de control estimula a cada frecuencia el mismo intervalo de tiempo.

El software para el control y monitorización de los experimentos ha sido desarrollado utilizando National Instrument LabVIEW 2015 (National Instruments, US). Este software presenta una interfaz amigable e intuitiva para que el operario configure todos los parámetros que tiene a su alcance.

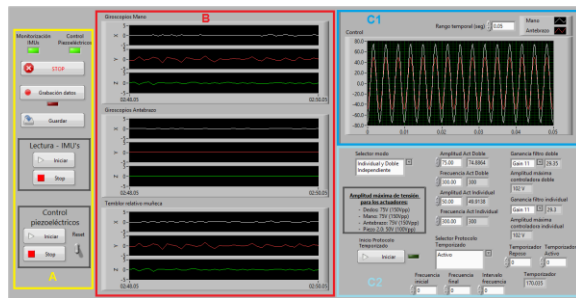


Figura 2: Interfaz de control: A.- Control manual para el inicio y fin del proceso; B.- Velocidad angular tridimensional de cada sensor y temblor relativo de la muñeca; C1.- Señal de control aplicada a los actuadores; C2.- Parámetros de configuración para el control de los modos predefinidos de operación.

La interfaz de usuario presenta tres secciones diferenciadas:

- Control manual del sistema: permite iniciar y finalizar por parte del operario los estimulación, monitorización de los sensores inerciales y grabación de datos.
- Datos inerciales. Cada sensor inercial envía al software de control la información de un giróscopo de tres ejes. Las seis primeras gráficas de la interfaz se corresponden con la velocidad angular en cada eje del sensor inercial colocado sobre la mano y sobre el antebrazo.

La velocidad angular de la muñeca (ω_w) se representa en las tres gráficas inferiores. Asumiendo que los desplazamientos que tienen lugar son muy pequeños, se puede aproximar la velocidad en la muñeca como

la diferencia entre la velocidad de la mano (ω_h) y el antebrazo (ω_f).

$$\omega_w = \omega_h - \omega_f \quad (1)$$

- Control avanzado de los actuadores piezoeléctricos y modos de operación predefinidos.

C1) Para conocer con exactitud la frecuencia y amplitud de las señales de control, la tarjeta de adquisición registra estas señales. Los resultados obtenidos se representan en tiempo real en la interfaz.

C2) Incluye los controles para la configuración de las señales de estimulación tanto para el control manual como para los controles predefinidos.

4 PROTOCOLO EXPERIMENTAL

Para la participación en los ensayos, se reclutarán entre 15 y 20 pacientes de TE en las consultas de Neurología Clínica del Hospital Universitario 12 de Octubre en Madrid. Los criterios de inclusión serán una edad superior a 18 años y que cumplan con los criterios para la diagnosis de TE [20]. Se consideran excluidos para el estudio pacientes con marcapasos o estimulador cerebral implantados, o con historial de epilepsia, trauma cerebral o ictus. Todos los procedimientos han sido aprobados por el comité ético del Hospital Universitario 12 de Octubre, así mismo los participantes habrán de dar su consentimiento por escrito para la realización de los ensayos.

Antes de empezar cada ensayo, los pacientes son examinados por un neurólogo que determina el brazo sobre el que se va a aplicar la estimulación, buscando aquél que muestre una mayor presencia de temblor.

Los actuadores piezoeléctricos se colocan en los pulpejos de los dedos, la palma de la mano y zonas del antebrazo sin presencia de vello corporal (Figura 3), lugares donde la densidad de corpúsculos de Paccini es mayor [21]. Los sensores inerciales se adhieren a la zona dorsal de la mano y el antebrazo, según se muestra en la Figura 4, de manera que pueda medirse el movimiento relativo de la muñeca.

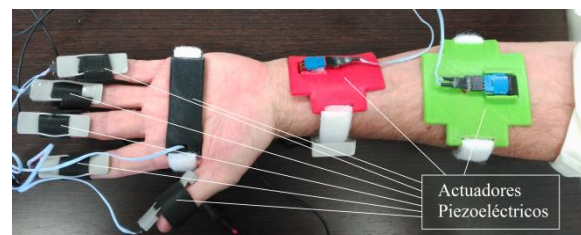


Figura 3: Colocación de los actuadores piezoeléctricos durante un ensayo.

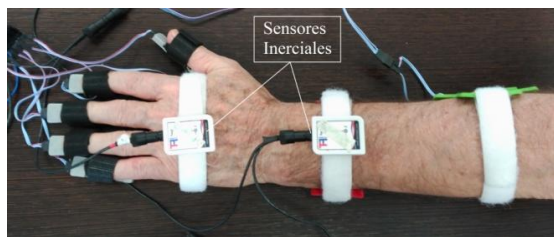


Figura 4: Colocación de los sensores inerciales durante un ensayo.

Para estandarizar el proceso de medida y garantizar la repetitividad de los ensayos, se ha diseñado una estructura de soporte para el brazo del paciente. De esta forma se asegura que todos los pacientes mantienen la misma posición durante los ensayos. Así mismo, se consigue reducir la fatiga al paciente y hacerle menos molesto el desarrollo experimento.

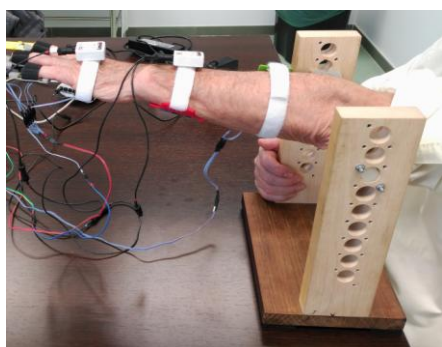


Figura 5: Paciente durante el desarrollo de un ensayo

Esta estructura de soporte ha sido desarrollada para sostener el peso del brazo del paciente, pero permitir la movilidad completa de la muñeca, de manera que no se comprometan los resultados del ensayo. Puesto que el TE se caracteriza por el temblor postural [4], durante el experimento se le pide al paciente que mantenga rectos brazo, antebrazo y mano en una posición paralela al suelo en contra de la gravedad. De esta manera se dan las condiciones necesarias para que aparezca el temblor y así poder medir su variación.

El protocolo experimental se divide en cinco fases de medidas; en todas las que se producen procesos de estimulación y no estimulación, los parámetros T_E y T_{NE} se mantienen constantes a 120 y 60 segundos respectivamente:

1. No estimulación: se monitoriza durante 300 segundos el temblor del paciente mientras no se aplica ningún tipo de estimulación.
2. Estimulación placebo: se aplica una estimulación predefinida siguiendo el modo normal de funcionamiento. La frecuencia de estimulación se fija a 50Hz, frecuencia a la cual no se produce excitación de los corpúsculos de Paccini [17].
3. Estimulación terapéutica: se aplica el mismo modo de operación que en el caso anterior

variando la frecuencia de estimulación a 250Hz.

4. Estimulación creciente: se aplica una estimulación predefinida siguiendo el modo creciente de funcionamiento. La frecuencia de estimulación comienza a 50Hz y aumenta hasta los 450Hz en intervalos de 50Hz; cada frecuencia es aplicada durante 13.33 segundos.
5. Estimulación aleatoria: se aplica una estimulación predefinida siguiendo el modo aleatorio de funcionamientos. El rango de frecuencias aplicados comienza en 50Hz y aumenta hasta los 450Hz en intervalos de 50Hz. El orden de aplicación de este rango de frecuencia es definido aleatoriamente, aplicándose estimulación a cada frecuencia durante 13.33 segundos.

A pesar de que la frecuencia de estimulación varía a lo largo de los ensayos, la amplitud de la señal de control se mantiene constante al nivel en el que se consigue el máximo efecto mecánico (50V para el PPA-1022 y 75V para los QP-10W y PPA-4011).

Además de los periodos descritos de estimulación y monitorización, periodos de descanso se intercalan entre ellos. De esta manera se previenen efectos aditivos de las diferentes estimulaciones y se consigue hacer más cómodo el ensayo para el paciente. Cada periodo de descanso tiene una duración aproximada de 10 minutos, de manera que la duración total de una sesión experimental dura aproximadamente 90 minutos.

5 ANÁLISIS DE DATOS

Una vez que la velocidad angular de la muñeca ha sido calculada siguiendo (1), se aplica un filtro de Butterworth paso-banda entre 3 y 12Hz. De esta manera se extrae únicamente la información relativa al movimiento producido por el temblor, excluyéndose otros tipos de movimiento o el ruido propio del sensor.

Para analizar los efectos producidos por cada frecuencia de estimulación, los datos se han clasificado en función de ella. Especial atención reclaman las medidas durante la no-estimulación, puesto que hay que diferenciar entre medidas pre-estimulación y post-estimulación. Para el análisis de datos se propone el valor RMS (*Root Mean Squared*) del modulo de la velocidad angular tridimensional para cada tipo de estimulación.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 6 se muestran los resultados de las cinco fases de un ensayo sobre un paciente con TE, se trata de un varón de 81 años que lleva padeciendo TE durante 10 años (nivel 2 de temblor según la escala Fahn-Tolosa-Marin).

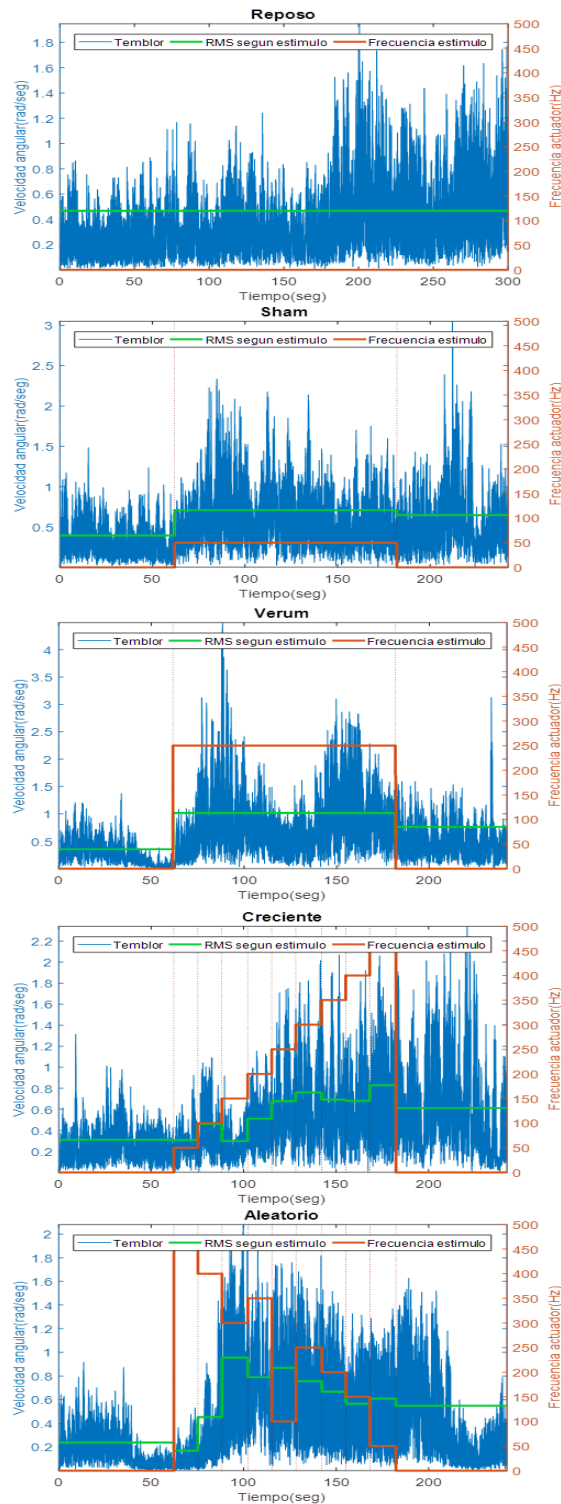


Figura 6: Resultado de un ensayo sobre un paciente con TE: eje X: tiempo(seg) ; eje Y izquierdo: velocidad angular (rad/seg) ; eje Y derecho: frecuencia estimulación (Hz). La línea azul representa el temblor medido por los sensores inerciales, la línea verde es el valor RMS de la medida teniendo en cuenta el intervalo en el que los actuadores estimulan a una misma frecuencia, la línea marrón indica la frecuencia de estimulación en cada instante de tiempo.

Como se puede comprobar la variabilidad del temblor (línea azul) es un factor a tener en cuenta a la hora de hacer un análisis de los datos. Haciendo un análisis preliminar los valores eficaces del temblor durante cada estimulación (línea verde) varían conforme varía la frecuencia de estimulación (línea naranja). Representando el valor eficaz del temblor durante cada estimulación frente a la frecuencia de estimulación (Figura 7) no solo se aprecia el aumento del temblor cuando se inicia la estimulación, al compararlo con la medida pre-estimulo, sino que también se ve como el temblor durante el post-estimulo es mayor al temblor pre-estimulo.

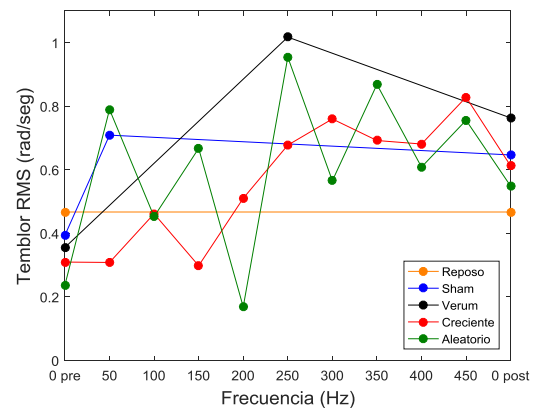


Figura 7: Representación del Temblor RMS medido durante cada estimulación frente a la frecuencia de estimulación en cada instante.

Queda pendiente para futuros estudios realizar un análisis estadístico exhaustivo de un mayor número de ensayos tanto en pacientes con TE como en sujetos sanos. Así se conseguirá una muestra de mayor tamaño que permita analizar en detalle las implicaciones y correlaciones entre la estimulación de las vías aferentes a través de los corpúsculos de Paccini con las manifestaciones del temblor en pacientes con TE.

Agradecimientos

Este trabajo fue desarrollado en el marco del proyecto ESSENTIAL, DPI2015-72638-EXP financiada por el programa Proyectos 'Explora-Ciencia' y 'Explora-Tecnología', en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016.

Referencias

- [1] U. Bonuccelli, "Essential tremor is a neurodegenerative disease," *J. Neural Transm.*, vol. 119, no. 11, pp. 1383–1387, Nov. 2012.
- [2] E. D. Louis, "Essential tremor," *Lancet Neurol.*, vol. 4, no. 2, pp. 100–110, 2005.
- [3] J. Benito-León, "Essential tremor: One of the most common neurodegenerative diseases?,"

- Neuroepidemiology*, vol. 36, no. 2, pp. 77–78, 2011.
- [4] G. Deuschl *et al.*, “Consensus Statement of the Movement Disorder Society on Tremor,” *Mov. Disord.*, vol. 13, no. S3, pp. 2–23, 1998.
- [5] K. L. Busenbark, J. Nash, S. Nash, J. P. Hubble, and W. C. Koller, “Is essential tremor benign?,” *Neurology*, vol. 41, no. 12, pp. 1982–1983, Dec. 1991.
- [6] E. D. Louis *et al.*, “Correlates of functional disability in essential tremor,” *Mov. Disord.*, vol. 16, no. 5, pp. 914–920, Sep. 2001.
- [7] B. Hellwig *et al.*, “Tremor-correlated cortical activity in essential tremor,” *Lancet*, vol. 357, no. 9255, pp. 519–523, 2001.
- [8] J. Raethjen and G. Deuschl, “The oscillating central network of Essential tremor,” *Clin. Neurophysiol.*, vol. 123, no. 1, pp. 61–64, 2012.
- [9] E. D. Louis, P. L. Faust, and J. P. G. Vonsattel, “Purkinje cell loss is a characteristic of essential tremor: Towards a more mature understanding of pathogenesis,” *Parkinsonism and Related Disorders*, vol. 18, no. 8, pp. 1003–1004, 2012.
- [10] E. D. Louis, “Essential tremor: evolving clinicopathological concepts in an era of intensive post-mortem enquiry,” *Lancet Neurol.*, vol. 9, no. 6, pp. 613–622, 2010.
- [11] R. J. Elble, “Tremor: Clinical Features, Pathophysiology, and Treatment,” *Neurologic Clinics*, vol. 27, no. 3, pp. 679–695, 2009.
- [12] S. Dosen *et al.*, “Online tremor suppression using electromyography and low-level electrical stimulation,” *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 23, no. 3, pp. 385–395, 2015.
- [13] R. Fuentes, P. Petersson, W. B. Siesser, M. G. Caron, and M. A. Nicolelis, “Spinal cord stimulation restores locomotion in animal models of Parkinson’s disease,” *Science* (80-.), vol. 323, no. 5921, pp. 1578–1582, Mar. 2009.
- [14] R. Fuentes, P. Petersson, and M. A. L. Nicolelis, “Restoration of locomotive function in Parkinson’s disease by spinal cord stimulation: Mechanistic approach,” *Eur. J. Neurosci.*, vol. 32, no. 7, pp. 1100–1108, Oct. 2010.
- [15] P. Geborek, H. Jörntell, and F. Bengtsson, “Stimulation within the cuneate nucleus suppresses synaptic activation of climbing fibers,” *Front. Neural Circuits*, vol. 6, no. January, p. 120, 2012.
- [16] D. G. Ferrington, B. S. Nail, and M. Rowe, “Human tactile detection thresholds: modification by inputs from specific tactile receptor classes,” *J. Physiol.*, vol. 272, no. 2, pp. 415–433, 1977.
- [17] E. Kandel, J. Schwartz, and T. Jessel, *Principles of Neural Science*. 2000.
- [18] J. Á. Gallego, E. Rocon, J. M. Belda-Lois, and J. L. Pons, “A neuroprosthesis for tremor management through the control of muscle co-contraction,” *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 10, no. 36, pp. 1–13, 2013.
- [19] J. H. Heo *et al.*, “Sensory electrical stimulation for suppression of postural tremor in patients with essential tremor,” *Biomed. Mater. Eng.*, vol. 26, pp. S803–S809, 2015.
- [20] P. Bain *et al.*, “Criteria for the diagnosis of essential tremor,” *Neurology*, vol. 54, no. 11 Suppl 4, p. S7, 2000.
- [21] E. Bruce Goldstein, *Sensation and perception*, 8th ed. Schreiber, Linda, 2010.

DEFINICIÓN DE UN PROTOCOLO PARA LA MEDIDA PRECISA DEL RANGO CERVICAL EMPLEANDO TECNOLOGÍA INERCIAL

Á. Martín¹, R. Raya^{1,2}, C. Sánchez¹, R. García¹, O. Ramírez², A. Otero¹

¹Universidad San Pablo CEU, rafael.raya@ceu.es

²Werium Assistive Solutions SL, oscar.ramirez@weriumsolutions.com

Resumen

Este artículo tiene por objetivo definir un protocolo para la medida precisa del rango articular cervical empleando la tecnología inercial. La utilización de instrumentos de medida, como los goniómetros tradicionales, la fotogrametría o los sensores inerciales permiten una medida objetiva para mejorar el diagnóstico de patologías y su rehabilitación. En este artículo se estudia cual es el mejor posicionamiento de dos sensores e identificamos los factores que influyen en la medida precisa del rango cervical. En el estudio participaron sujetos sin dolor cervical. La medida angular en dos sesiones independientes, siguiendo el protocolo establecido, muestra una diferencia menor a un grado entre ellas, lo que demuestra ser un sistema y protocolo válidos para el objetivo definido al comienzo del trabajo.

Palabras Clave: Sensor inercial, cervical, biomecánica, goniometría.

1 INTRODUCCIÓN

El rango de movimiento cervical puede disminuir por muchas causas o condiciones: dolor articular, inflamación, infección, lesiones motoras o neuromotoras, [1]. Una de las causas con mayor prevalencia es el llamado latigazo o esguince cervical (whiplash), [2], una lesión provocada por un movimiento violento de flexo-extensión cervical. Alrededor de un 25% de los accidentes de tráfico provocan esta lesión, según la Dirección General de Tráfico (DGT). El 98% de las lesiones cervicales están causadas por accidentes de tráfico.

Unida a esta lesión, podemos encontrar otras patologías, como es el caso de las lesiones neuromotoras, como por ejemplo, la Parálisis Cerebral, [3], (2-3 casos por cada 1000 habitantes) en el que es frecuente la hipotonía, un tono muscular debilitado que dificulta el mantenimiento de una postura cervical adecuada.

En todos estos casos se requiere una medida del rango articular para apoyar un diagnóstico correcto y para medir, de forma objetiva, el progreso terapéutico. Existen diversos instrumentos y

dispositivos de medición, como la fotogrametría, los inclinómetros, los sensores inerciales o los goniómetros tradicionales. La tecnología inercial presenta interesantes ventajas debido a su simplicidad, bajo coste, precisión y la capacidad de registrar los resultados automáticamente.

La medida angular y su comparación con los considerados patrones normales del rango de movimiento cervical permiten medir la evolución de la lesión cuando el paciente recibe una terapia o un tratamiento. En este sentido, existen diversos artículos científicos en los que se establecen la normalidad del rango de movimiento cervical, [4, 5]. En estos artículos destaca la gran heterogeneidad en los resultados, que parecen poner de manifiesto que existe un rango de normalidad muy amplio. La Tabla 1 muestra los resultados de normalidad de dos sesiones consecutivas medidas en pacientes sanos, [4].

En nuestro estudio, participarán sujetos sanos en los que, en primer lugar estudiaremos la relación del rango cervical estimado con el que se presenta en la literatura científica. Realizaremos distintos protocolos con el fin de identificar cómo influyen principalmente el posicionamiento de los sensores en el cuerpo del sujeto y la importancia de definir correctamente la posición neutral en la que se calibra el sistema para realizar la medición del rango articular.

La determinación de la posición neutral es un factor clave y puede condicionar la repetitividad entre medidas de un mismo sujeto o una misma población. La hipótesis que se plantea en este artículo es que la medida del rango total del movimiento mejora la precisión respecto a la medida de los rangos independientes. Es decir, el movimiento a evaluar debe ser una flexoextensión completo (de extremo a extremo) en lugar de una flexión y una extensión independientes. Con el fin de ver si existen diferencias significativas entre ambos casos, el artículo presenta el protocolo I y II que miden los rangos de forma independiente y completa respectivamente.

Otro de los factores que influyen significativamente en la estimación angular, es la ubicación de los sensores en los segmentos corporales. En este sentido, existen algunos estudios que concluyen que la mejor ubicación para estimar el rango cervical es

ubicar un sensor en C0 (cabeza) y otro sensor en la vértebra T4, [6].

Tabla 1: Rango Normal del Movimiento Cervical medido en dos sesiones consecutivas, [4]

Movimiento	Amplitud Sesión1	Amplitud Sesión 2
Flexión	$52,9^\circ \pm 9,0^\circ$	$52,6^\circ \pm 7,1^\circ$
Extensión	$78,8^\circ \pm 12,5^\circ$	$80,2^\circ \pm 13,4^\circ$
Inclinación derecha	$41,4^\circ \pm 8,5^\circ$	$42,1^\circ \pm 9,5^\circ$
Inclinación izquierda	$47,0^\circ \pm 9,4^\circ$	$46,6^\circ \pm 8,6^\circ$
Rotación derecha	$73,2^\circ \pm 7,2^\circ$	$73,4^\circ \pm 7,5^\circ$
Rotación izquierda	$74,8^\circ \pm 9,7^\circ$	$74,9^\circ \pm 9,0^\circ$

2 METODOLOGÍA

2.1 EQUIPOS

Los equipos empleados han sido fabricados por la empresa Werium Assistive Solutions SL. Los sensores ofrecen, de acuerdo a la información proporcionada por el fabricante, una precisión de 1 grado, con una frecuencia de muestreo de 50Hz. Estos sensores se conectan de forma inalámbrica al computador mediante una conexión Bluetooth. En esta experimentación se emplean dos sensores con el fin de medir la orientación de los dos segmentos corporales que intervienen en el movimiento cervical: cabeza y tronco.

El software ofrecido por Werium permite la captura y generación de un informe con la medida articular realizada. Este informe será empleado para la extracción de los datos presentados en este artículo.

2.2 PROTOCOLO

2.2.1 Participantes. Movimientos a realizar durante la medida del rango cervical

En la experimentación participaron 36 sujetos (16 mujeres y 20 hombres) de $25,33 \pm 8,6$ años de edad sin ninguna patología cervical para el Protocolo I. Para el protocolo II participaron 27 sujetos (10 mujeres y 17 hombres) con $26,63 \pm 9,44$ años de edad sin ninguna patología cervical. Se realizó una evaluación estadística para determinar que no existe una diferencia significativa en cuanto a la edad entre ambos grupos.

La persona encargada de realizar la medición explicó al inicio de la experimentación la prueba a realizar. El sujeto debía realizar 6 movimientos de cabeza alcanzando la máxima amplitud en los tres ejes de movimiento, esto es, realizar una flexión, una extensión, una inclinación izquierda y derecha, una rotación izquierda y derecha. Los movimientos se realizaron siguiendo un orden aleatorio. El sujeto realizó los movimientos sentado en una silla, con las manos sobre las piernas, la espalda apoyada sobre el respaldo y las rodillas formando un ángulo recto con los pies completamente apoyados sobre el suelo.

Cada sujeto repitió los movimientos en dos sesiones independientes con el fin de estudiar la correlación y repetitividad entre ambas.

2.2.2 Factores que incluyen en el protocolo de medida

Como se ha comentado, con el fin de validar el protocolo para la medida del rango cervical se estudian dos factores considerados claves para alcanzar la máxima precisión y repetitividad: la ubicación de los sensores y el establecimiento de la posición neutral a partir de la que se evalúa el rango articular.

Para estudiar cómo influye la ubicación de los sensores se estudiarán dos opciones que han sido identificadas en la bibliografía como las más adecuadas, [6]. La primera opción será colocar el primer sensor en C0 (cabeza) y el segundo sensor en la vértebra C7. La segunda opción será colocar el primer sensor en C0 (cabeza) y el segundo en la vértebra T4. La figura 1 muestra una posible ubicación de los sensores utilizados.

El segundo factor que se estudia en este artículo es el efecto de la posición neutral, posición cero o posición en la que se calibran los dispositivos antes de iniciar la medida. Una variación en la posición neutral en medidas consecutivas puede obviamente modificar el rango de medición, lo que deteriora la repetitividad de la medida. Esto es particularmente importante si consideramos que este tipo de instrumentos será empleado para determinar si existe una mejora del rango articular ante una terapia o tratamiento.

Para verificar este hecho, realizamos dos protocolos. En el protocolo I, cada sujeto realizará los 6 movimientos de forma independiente y calibrando al inicio de cada uno de ellos, esto es: 1) Flexión, 2) Extensión, 3) Inclinación izquierda, 4) Inclinación derecha, 5) Rotación izquierda, 6) Rotación derecha. En este protocolo, el cálculo de la posición neutral se reinicia al comienzo de cada movimiento. Esto puede favorecer mayor variabilidad en los resultados medidos, debido a que la postura neutral puede variar de una medida a otra.

Para verificar el efecto de este factor se plantea el Protocolo II en el que se mide el rango total del movimiento de extremo a extremo, esto es: 1)

Flexoextensión, 2) Inclinación derecha-izquierda y 3) Rotación izquierda-derecha. En este caso, el sistema se calibra al iniciar cada movimiento completo. De esta forma, el rango total no es tan dependiente de la posición neutral y, según nuestra hipótesis, se espera que mejore la repetitividad en la medida siguiendo el Protocolo II.

Una vez analizados los resultados de cada protocolo, se comparan entre las dos sesiones realizadas y con las publicaciones científicas que determinan el patrón normal del rango cervical, citadas en la sección anterior.



Figura 1. Ubicación de los sensores en C0 y T4

2.2.3 Análisis de los resultados

Para obtener los resultados de la medida articular se empleó el software de Werium. De la captura realizada se obtuvieron los rangos máximos y mínimos de cada movimiento, de los que finalmente se calculó la media y desviación para todos los usuarios para la sesión 1 y la sesión 2 (set 1 y set 2 en las figuras de la sección siguiente). Adicionalmente, se calculó el coeficiente de correlación intraclass (ICC) para determinar la fiabilidad de las medidas entre las dos sesiones realizadas y para todas las casuísticas explicadas en la sección 2.2.2.

3 RESULTADOS

En esta sección presentamos los resultados del Protocolo I y II. El objetivo del análisis que se presenta a continuación es determinar si la mejor ubicación del segundo sensor es C7 o T4 y determinar cómo influye la determinación de la posición neutral en la repetitividad de la medida.

3.1. PROTOCOLO I

En este primer protocolo, el sujeto realiza movimientos de forma independiente, calibrando una vez al comienzo de cada uno de ellos.

Las figuras 2 (T4) y 3 (C7) muestran los rangos medidos para los movimientos de flexión, extensión, inclinación izquierda, inclinación derecha, rotación izquierda, rotación derecha. Se representa la media y desviación estándar de la realización de los 36 sujetos que participaron en esta experimentación tanto para la primera sesión (Set 1), como para la segunda sesión (Set 2). Adicionalmente, se calcula el

coeficiente ICC con el fin de estimar la repetitividad entre medidas en distintas sesiones con la misma población de sujetos.

	Set 1 (Mean \pm SD)	Set 2 (Mean \pm SD)	ICC
Flexion	59,54° \pm 14,14°	64,25° \pm 12,37°	0,75
Extension	67,24° \pm 14,32°	67,06° \pm 15,16°	0,95
Right lateral inclination	39,68° \pm 7,85°	40,21° \pm 6,37°	0,88
Left lateral inclination	43,56° \pm 8,01°	43,52° \pm 7,07°	0,79
Right rotation	73,27° \pm 9,99°	75,51° \pm 10,38°	0,91
Left rotation	79,17° \pm 10,75°	79,88° \pm 10,57°	0,92

Figura 2. Protocolo I. C0-T4

	Set 1 (Mean \pm SD)	Set 2 (Mean \pm SD)	ICC
Flexion	51,71° \pm 12,71°	52,74° \pm 15,77°	0,88
Extension	52,90° \pm 14,28°	54,46° \pm 15,10°	0,93
Right lateral inclination	34,57° \pm 6,41°	34,16° \pm 7,46°	0,88
Left lateral inclination	36,66° \pm 7,77°	37,69° \pm 7,72°	0,9
Right rotation	64,76° \pm 71,15°	67,67° \pm 9,58°	0,9
Left rotation	71,15° \pm 7,98°	73,44° \pm 11,77°	0,87

Figura 3. Protocolo I. C0-C7

3.2. PROTOCOLO II

En el protocolo II los movimientos se realizan de forma completa, es decir, de extremo a extremo. La Figura 4 muestra los resultados para el Protocolo II para los movimientos de Flexo-Extensión (FE), Inclinación (LAT) y rotación (ROT) cuando el segundo sensor está ubicado en la vértebra T4.

	Set 1 (Mean \pm SD)	Set 2 (Mean \pm SD)	ICC
F-E	121,91° \pm 22,78°	121,77° \pm 19,98°	0,97
LAT	80,42° \pm 14,79°	79,46° \pm 15,19°	0,91
ROT	151,01° \pm 17,31°	151,38° \pm 19,87°	0,96

Figura 4. Medida del rango total para C0-T4

La figura 5 muestra los mismos movimientos que en la figura anterior para la ubicación del segundo sensor en la vértebra C7.

	Set 1 (Mean \pm SD)	Set 2 (Mean \pm SD)	ICC
F-E	101,06° \pm 21,58°	99,28° \pm 20,75°	0,98
LAT	72,33° \pm 13,16°	74,05° \pm 14,29°	0,93
ROT	136,17° \pm 20,22°	136,76° \pm 19,47°	0,97

Figura 5. Medida del rango total para C0-C7

Finalmente, la Figura 6 muestra los patrones normales del rango cervical (completos), obtenidos de la bibliografía, con el fin de que sirvan de comparativa con los resultados obtenidos en el Protocolo II.

	Set 1 (Mean \pm SD)	Set 2 (Mean \pm SD)
F-E	131,7° \pm 21,5°	132,8° \pm 20,5°
LAT	88,4° \pm 17,9°	88,7° \pm 18,1°
ROT	148° \pm 16,9°	148,3° \pm 16,5°

Figura 6. Rango total obtenido de la bibliografía (patrón de normalidad)

4 DISCUSIÓN

Tras evaluar los resultados obtenidos podemos concluir aspectos interesantes a tener en cuenta en el protocolo de medida del rango cervical empleando dos sensores inerciales. En primer lugar, consideramos como patrón normal del movimiento a aquel descrito en la Tabla I de la sección de Introducción. Una de las primeras conclusiones que podemos destacar es la amplia variabilidad en el patrón de normalidad definido en la bibliografía. De hecho, una justificación de ello lo podemos ver en los valores tan elevados de la desviación estándar. En nuestro caso, este valor también es, de hecho, elevado, al igual que en las publicaciones científicas citadas.

En relación a la comparativa entre el Protocolo I y el II, es preciso señalar que los ICCs son más bajos en el protocolo I (entre 0.75 y 0.92 para T4 y entre 0.87 y 0.93 para C7) que para el protocolo II (entre 0.91 y 0.97), como podemos ver en las figuras 2 y 3 frente a la 4 y la 5. Esto confirma que el protocolo II presenta una mejor repetitividad en la medida. En el caso del Protocolo II la diferencia de medida entre la sesión 1 y la sesión 2 es menor a un grado. Como se ha comentado, esto es particularmente importante si este tipo de sistemas se emplea para realizar el seguimiento de un tratamiento o una terapia.

En relación a la evaluación del mejor posicionamiento del segundo sensor en la vértebra

C7 o en la T4, podemos ver en primer lugar que el movimiento de extensión parece ser considerablemente menor (respecto a la normalidad) en todos los casos en los que el sensor se ubica en C7. Este hecho puede deberse principalmente a que el sujeto percibe el sensor en C7 en el movimiento de extensión y por tanto, no alcanza su máximo rango. Otra hipótesis es que se reduce el rango por artefactos que aparecen en la medida debido al movimiento de la piel.

Finalmente, centrándonos en el protocolo II, si comparamos la estimación del rango articular con el segundo sensor ubicado en T4 (Figura 4) observamos que es más próximo a los valores de normalidad (Tabla I) que con la ubicación del sensor en C7 (Figura 5). Por tanto, la ubicación en T4 parece ser una mejor opción, tal y como ya se había identificado en la literatura científica, [6].

5 CONCLUSIÓN

Este artículo ha estudiado dos factores que influyen significativamente en la precisión de la medida del rango articular cervical mediante tecnología inercial: la ubicación de los sensores en los segmentos corporales y la influencia de la posición neutral en la repetitividad de la medida.

Los resultados demuestran que se obtiene una estimación más precisa (más próxima a los valores de normalidad definidos en la bibliografía) del rango articular con la ubicación de un primer sensor en C0 (cabeza) y un segundo sensor en la vértebra T4 (en lugar de C7).

Por otro lado, los resultados demuestran que la correcta definición de la posición neutral antes de realizar la medida es fundamental para obtener una correcta repetitividad en la medida. Para reducir la variabilidad en la definición de la postura neutral, se aconseja la medida de rangos totales de movimiento, que corrigen tal variabilidad como ha quedado demostrado en la sección anterior.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer la participación de alumnos y profesores de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad CEU San Pablo que participaron en este estudio.

Referencias

- [1] Michele Curatolo, MD, corresponding author Nikolai Bogduk, MD, Paul C. Ivancic, Samuel A. McLean, MD, Gunter P. Siegmund, and Beth Winkelstein. The role of tissue damage in whiplash associated disorder. Dec 2011

- [2] Sun Y. Yang, Anthony J. Boniello, Caroline E. Poorman, Andy L. Chang, Shenglin Wang, and Peter G. Passias. A Review of the Diagnosis and Treatment of Atlantoaxial Dislocations. May 22 2014
- [3] Bax, M., Goldstein, M., Rosenbaum, P., Leviton, A., Paneth, N., Dan, B., ... Damiano, D. (2005). Proposed definition and classification of cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 47(8), 571–576. <http://doi.org/10.1017/S001216220500112X>
- [4] Fletcher James P., Bandy William D. Intrarater Reliability of CROM Measurement of Cervical Spine Active Range of Motion in Persons With and Without Neck Pain. *Journal of orthopaedic & sports physical therapy*, October 2008
- [5] Tousignant M., Smeesters C. Breton A., Coriveau H., Criterion Validity Study of the Cervical Range of Motion (CROM) Device for Rotational Range of Motion on Healthy Adults, November 2016
- [6] Theobald et al. Do inertial sensors represent a viable method to reliably measure cervical spine range of motion?, *Man Ther.* 2012 Feb;17(1):92-6.doi: 10.1016/j.math.2011.06.007. Epub 2011 Jul 23.

SISTEMA BRAIN-COMPUTER INTEFACE DE NAVEGACIÓN WEB ORIENTADO A PERSONAS CON GRAVE DISCAPACIDAD

Víctor Martínez-Cagigal*
victor.martinez@gib.tel.uva.es

Javier Gomez-Pilar*, Daniel Álvarez*, Eduardo Santamaría-Vázquez y Roberto Hornero*
javier.gomez@gib.tel.uva.es, dalvgon@ribera.tel.uva.es, eduardo.santamaria@gib.tel.uva.es, robhor@tel.uva.es

*Grupo de Ingeniería Biomédica, Universidad de Valladolid, Paseo Belén 15, 47011, Valladolid, España

Resumen

En este estudio se presenta un navegador web basado en un sistema Brain-Computer Interface (BCI) orientado al uso por parte de personas con grave discapacidad. El control de la aplicación lo gobiernan los potenciales evocados P300, generados por el usuario de manera involuntaria a través de un estímulo odd-ball visual. A diferencia de las aproximaciones anteriores, el navegador desarrollado emplea un umbral que determina la atención del usuario, permitiendo un control asíncrono que no requiere modos de lectura para evitar una selección continua de comandos. La aplicación se ha evaluado con 5 sujetos de control y 16 enfermos de esclerosis múltiple, alcanzando precisiones medias del 95,75% y del 84,14%, respectivamente. Dichos resultados sugieren que el navegador web puede ser adecuado para el uso por parte de personas con grave discapacidad.

Palabras Clave: Brain-Computer Interface (BCI), potenciales evocados P300, electroencefalografía (EEG), navegador web, esclerosis múltiple.

1 INTRODUCCIÓN

El uso de sistemas Brain-Computer Interface (BCI) puede mejorar la calidad de vida de las personas que sufren una grave discapacidad. Estos sistemas son capaces de establecer una comunicación entre el cerebro y el entorno sin la necesidad de emplear los músculos o los nervios periféricos, permitiendo a los usuarios controlar aplicaciones con sus propias ondas cerebrales [11]. Aunque existen multitud de métodos para registrar la actividad cerebral, es común emplear el electroencefalograma (EEG) debido a su bajo coste, facilidad de uso, portabilidad y naturaleza no invasiva [11].

Los enfermos de esclerosis múltiple (EM) son, de hecho, usuarios potenciales de este tipo de sistemas. La EM se considera la enfermedad autoinmune del

sistema nervioso central más común en todo el mundo [12]. La enfermedad produce inflamaciones en las vainas de mielina de las neuronas del cerebro y la médula espinal, dificultando la propagación de los estímulos eléctricos. Esto resulta en un amplio rango de síntomas, entre los cuales se incluyen pérdida de movilidad, problemas psiquiátricos y déficits cognitivos [12].

Los sistemas BCI permiten a los enfermos de EM controlar aplicaciones empleando únicamente su señal de EEG, reduciendo su dependencia. Dado el avance de las telecomunicaciones en las últimas décadas, Internet se ha convertido en un medio de comunicación global cotidiano. No obstante, los navegadores web han sido desarrollados para controlarse mediante teclado y ratón, dificultando su accesibilidad para las personas con grave discapacidad [6]. Por tanto, parece adecuado desarrollar una herramienta que facilite la accesibilidad de Internet para aquellas personas cuya capacidad de comunicación está restringida, con el fin de mejorar su calidad de vida y aumentar su autonomía.

Se ha tratado de resolver este problema con anterioridad, empleando tanto señales endógenas, (i.e., potenciales corticales lentos y ritmos sensoriomotores) [1,3]; como señales exógenas (i.e., potenciales evocados P300 y potenciales evocados visuales) [7,10,13]. No obstante, todas las aproximaciones anteriores eran síncronas, siendo necesaria la inclusión de un modo de lectura para evitar una selección continua de comandos. Sin embargo, las aplicaciones síncronas no son prácticas en una navegación realmente completa, puesto que el sistema BCI tomará decisiones incluso cuando el usuario no atiende a la estimulación [8].

En este estudio se presenta un navegador web BCI basado en potenciales evocados P300 capaz de superar las limitaciones de los navegadores anteriores. Para ello, la aplicación debe ser: (i) rápida; (ii) fácil de usar; (iii) autónoma; y (iv) asíncrona.

2 SUJETOS Y MÉTODOS

2.1 POBLACIÓN DE ESTUDIO

La población de estudio estaba formada por 5 sujetos de control (SC) y 16 enfermos de esclerosis múltiple (EM), reclutados a través del Centro de Dependencia Estatal de Discapacidad y Dependencia (CRE-DyD) de San Andrés del Rabanedo (León). Todos ellos fueron informados sobre la participación en el estudio, dando su consentimiento para formar parte del mismo. En la Tabla 1 se recoge la información demográfica y clínica de los participantes del estudio.

2.2 NAVEGADOR WEB BCI

El navegador web desarrollado se compone de tres etapas principales: (1) etapa de adquisición, que registra y pre-procesa la señal EEG; (2) etapa de procesado, que muestra los estímulos y determina el comando seleccionado por el usuario; y (3) etapa de navegación web, que traduce la intención del usuario en comandos de navegación web.

2.2.1 Etapa de adquisición

La etapa de adquisición se encarga de registrar y pre-procesar la señal EEG. Se emplearon un total de 8 electrodos colocados en las posiciones estratégicas más comunes a la hora de detectar potenciales evocados P300: Fz, Cz, Pz, P3, P4, PO7, PO8 y Oz [4]. El registro de la señal se realizó con una frecuencia de muestreo de 256 Hz. Como pre-procesado de la señal, se aplicó un filtro de ranura a 50 Hz, un filtro paso-banda entre 0.1–60 Hz, y un filtro espacial de referencia de media común. Asimismo, se empleó el sistema de propósito general BCI200 para la adquisición y el pre-procesado de la señal [9].

2.2.2 Etapa de procesado

La etapa de procesado se encarga de mostrar los estímulos visuales y de detectar los potenciales evocados P300 del usuario, así como de determinar qué comando desea seleccionar en cada momento. Los estímulos se presentan de acuerdo a un paradigma *odd-ball* visual, conocido con el nombre de *row-col paradigm* [2]. Se presenta una matriz que contiene los posibles comandos a seleccionar por el usuario, cuyas filas y columnas se iluminan aleatoriamente. El usuario únicamente debe fijarse en el comando que desee seleccionar y, una vez se ilumine la fila y la columna que contienen dicho comando, se generará un potencial evocado P300 en la zona parietal de su córtex, aproximadamente 300 ms después de que el estímulo se haya producido [2,11]. Detectando, por tanto, la fila y la columna que los han generado, podemos determinar el comando

Tabla 1. Características demográficas y clínicas de los participantes con esclerosis múltiple

Usuario	Sexo	Edad	Discapacidad motora	Capacidad cognitiva	Capacidad de atención sostenida
E01	M	30	Nula	Muy alta	Muy alta
E02	H	31	Nula	Alta	Muy alta
E03	H	43	Leve	Muy alta	Alta
E04	M	47	Moderada	Normal	Alta
E05	H	56	Moderada	Baja	Muy baja
E06	M	32	Nula	Normal	Normal
E07	H	35	Nula	Muy alta	Muy alta
E08	H	41	Nula	Alta	Alta
E09	F	49	Nula	Normal	Muy alta
E10	H	44	Mild	Normal	Baja
E11	M	41	Moderada	Normal	Alta
E12	H	43	Moderada	Muy alta	Normal
E13	H	44	Nula	Alta	Alta
E14	H	52	Moderada	Muy alta	Normal
E15	M	38	Nula	Normal	Alta
E16	H	47	Moderada	Normal	Normal

M: Mujer, H: Hombre.

que ha deseado seleccionar mediante el cálculo de su intersección. Debido al gran número de comandos necesarios para experimentar una navegación web completa y libre, hemos optado por emplear dos matrices de selección de comandos distintas que se intercalan a voluntad del usuario, tal y como se puede observar en la Figura 1.

Una vez se han iluminado todas las filas y columnas de la matriz que esté activa, es necesario determinar cuándo se han producido los potenciales P300. Para ello, es necesario aplicar una etapa de extracción y clasificación de características. En este caso, las características se extrajeron aplicando una ventana de 800 ms a partir del inicio de cada estímulo y reduciendo la frecuencia de muestreo a 20 Hz, obteniendo, por tanto, 16 muestras por estímulo y canal [5,10]. En la Figura 2 se puede observar la respuesta evocada de todos los sujetos sobre el canal Pz, lo cual confirma que la ventana escogida es lo suficientemente grande como para capturar el potencial P300. Posteriormente, se aplicó un análisis de discriminante lineal paso-a-paso (SWLDA, *Step-Wise Linear Discriminant Analysis*) con el fin de clasificar cada estímulo según la presencia o la ausencia de un potencial P300 [4,5]. De esta manera, una vez se retornen la fila y la columna que contienen potenciales P300 con mayor probabilidad, basta con realizar la intersección de ambas para determinar el comando que desea seleccionar el usuario en tiempo real.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, las matrices de selección de comandos son procesos síncronos. Esto implica que el sistema tomará una decisión tanto si el usuario está atendiendo a la estimulación visual como si no [8]. En este estudio



Figura 1. Interfaz de usuario: la matriz de selección activa se muestra en la parte derecha de la pantalla y el navegador web en la parte izquierda. La matriz de selección puede intercarse entre matriz de navegación (izquierda) y de teclado (derecha) a voluntad del usuario. Como se muestra en el *buffer* (a), el usuario ha seleccionado “005” y, por tanto, las selecciones potenciales (b) se marcan en verde, mientras que el resto (c) se mantienen en gris. En esta captura, la penúltima fila de la matriz de navegación está siendo iluminada.

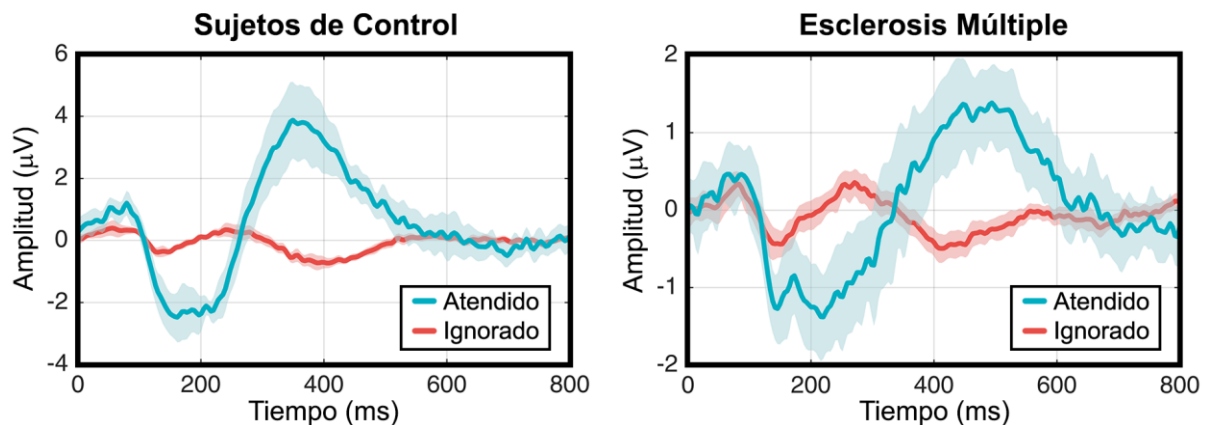


Figura 2. Respuesta evocada en el canal Pz de todos los usuarios SC (izquierda) y EM (derecha) cuando atienden al estímulo visual (azul) o lo ignoran (rojo). La línea gruesa muestra la media de todos los sujetos de cada sub-grupo, mientras que el área sombreada indica la desviación típica.

hemos aplicado un umbral asíncrono que monitoriza la atención del usuario y determina si está prestando atención a la estimulación. Para ello, es necesario registrar de manera *offline* una serie de intentos del usuario deletreando una palabra mientras atiende a la estimulación y otros intentos ignorándola. Debido a la ausencia de atención, se espera que los *scores* (i.e., probabilidad de encontrar un potencial P300 en cada iluminación) retornados por el clasificador SWLDA de los intentos ignorando la matriz sean menores que los intentos atendidos. Posteriormente, se calcula la curva ROC que ilustra el compromiso entre sensibilidad y especificidad a la hora de discernir entre intentos atendidos e ignorados. Finalmente, el umbral se calcula como el punto óptimo de dicha curva, es decir, el punto que maximiza el par sensibilidad-especificidad en mayor medida.

2.2.3 Etapa de navegación web

La etapa de navegación web se encarga de recibir e interpretar los comandos seleccionados y proveer realimentación al usuario en tiempo real. Como se puede ver en la Figura 1, la matriz de selección de comandos se coloca a la derecha de la pantalla, mientras que a la izquierda se muestra el navegador web. Esta etapa se ha desarrollado como una extensión del navegador web Google Chrome. Si el usuario desea seleccionar un hipervínculo, debe seleccionar el comando “TAG”. Una vez seleccionado, se inicializa un *buffer* en la parte superior izquierda de la pantalla que indica los comandos que va seleccionando el usuario. Asimismo, la extensión identifica todos los nodos (i.e., objetos seleccionables, como enlaces, botones o formularios)

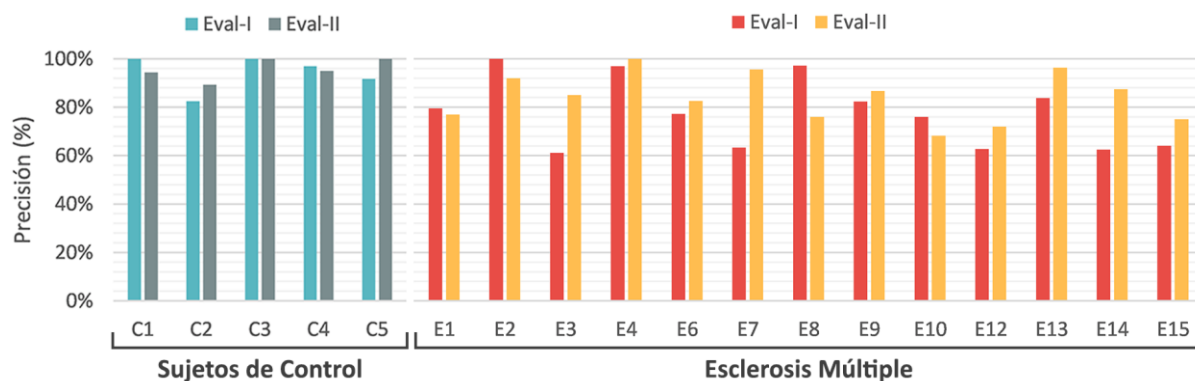


Figura 3. Precisiones medias alcanzadas por cada uno de los sujetos de la población de estudio en las sesiones de evaluación de la aplicación: (izquierda) sujetos de control, (derecha) enfermos de esclerosis múltiple.

de la web que se está visualizando y los etiqueta con una codificación formada por los números 0–5. Para visitar un enlace basta con introducir su codificación [7]. Si el usuario comete un error, puede solventarlo. De manera adicional, se marcan con color verde las selecciones en potencia, es decir, aquellos nodos cuya codificación empieza por el código previamente introducido por el usuario, con el objetivo de facilitar el uso de la aplicación.

2.3 PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN

Durante las sesiones de evaluación, todos los participantes estuvieron sentados en una silla o en su propia silla de ruedas, en frente de una pantalla panorámica que mostraba la aplicación. Cada usuario realizó cuatro sesiones distintas: dos sesiones de calibración y dos sesiones de evaluación.

El objetivo de las sesiones de calibración era entrenar los pesos del clasificador SWLDA, el número de secuencias y el valor del umbral óptimos para cada usuario. Para los dos primeros se ordenó a los usuarios tratar de escribir 4 palabras de 6 caracteres. Posteriormente, se entrenó el clasificador y se hallaron los pesos y el número de secuencias óptimo. Para calibrar el umbral, se ordenó a los usuarios ignorar y atender a la matriz de navegación durante 4 palabras de 6 caracteres. Una vez recogidos los *scores* de cada una de las selecciones, se calculó el umbral óptimo mediante una curva ROC.

Las sesiones de evaluación consistieron en la realización de una serie de tareas con el navegador. En la primera sesión se incluyeron 5 tareas distintas sin usar el umbral de decisión, mientras que en la segunda se realizaron 3 tareas con el umbral activo. Las tareas involucraban la navegación a través de *Wikipedia*, la selección de un enlace, la búsqueda en *Google*, la publicación de un *tweet*, la respuesta a un e-mail y la lectura de una página web.

3 RESULTADOS

Los resultados obtenidos se han analizado tanto de forma cuantitativa (i.e., medidas de precisión, tiempo, etcétera), como cualitativa (i.e., cuestionarios de satisfacción). En la Figura 3 se muestran las precisiones medias obtenidas para cada usuario en las sesiones de evaluación. Nótese que los usuarios EM etiquetados con los números 5, 11 y 16 se descartaron de la evaluación por obtener precisiones inferiores al 70% en el entrenamiento del clasificador. Asimismo, los resultados del análisis cualitativo se muestran en la Figura 4.

4 DISCUSIÓN

Tal y como se ha mencionado previamente, tres de los usuarios EM se descartaron de la evaluación debido a la baja precisión de su clasificador en las sesiones de calibración. Esto se debe a que su respuesta P300 estaba demasiado atenuada y/o su latencia era muy variable, probablemente debido un déficit de atención mientras se realizaba la tarea. Los usuarios SC alcanzaron mejores precisiones en las dos sesiones de calibración ($100,00\% \pm 0,00\%$ y $95,00\% \pm 4,56\%$) que los usuarios EM ($80,45\% \pm 13,65\%$ y $79,81\% \pm 10,60\%$). Asimismo, no solo el rendimiento de los usuarios SC fue superior, sino que el número de secuencias óptimo para ellos fue inferior al requerido por los usuarios EM (SC $8,90 \pm 2,07$; EM $9,85 \pm 3,29$), causando una mayor velocidad a la hora de utilizar la aplicación.

Aunque todos los usuarios SC pudieron superar todas las tareas en ambas sesiones de evaluación, no todos los usuarios EM fueron capaces de hacerlo. En la primera sesión de evaluación, con el umbral de decisión desactivado, los usuarios SC alcanzaron mayores precisiones que los usuarios EM (SC $94,23\% \pm 7,39\%$; EM $77,46\% \pm 14,24\%$). Todos los usuarios SC alcanzaron precisiones superiores al

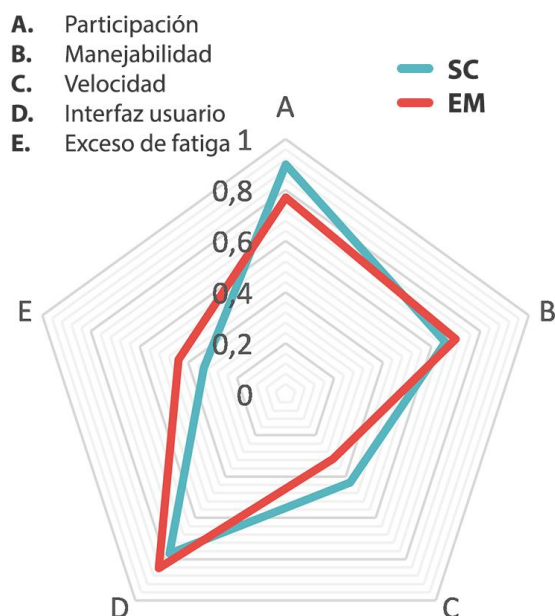


Figura 4. Resultados del análisis cualitativo realizado mediante cuestionarios de satisfacción. Se han evaluado cinco aspectos de la aplicación: (a) participación, (b) manejabilidad, (c) velocidad, (d) interfaz de usuario y (e) exceso de fatiga visual.

80%, y dos de ellos del 100%. En el caso de los usuarios EM, cinco de ellos superaron el 80%, y uno de ellos consiguió un control perfecto.

En general, en la segunda sesión de evaluación, con el umbral ya activo, se observa una mejora en el rendimiento de toda la población de estudio, aunque los usuarios SC siguen alcanzando precisiones más altas que los usuarios EM (SC $95,75\% \pm 4,48\%$; EM $84,14\% \pm 10,08\%$). Todos los usuarios SC superaron el 80% y dos de ellos alcanzaron el 100%. Ocho usuarios EM superaron el 80% y uno de ellos alcanzó un control perfecto. Estos resultados sugieren que la inclusión del umbral de atención del usuario no solo permite un control asíncrono de la aplicación, sino que también aumenta el rendimiento del sistema.

El análisis cualitativo muestra que todos los participantes, en general, se han mostrado satisfechos con la aplicación. El aspecto mejor valorado por ambos sub-grupos fue la interfaz de usuario, debido a su simplicidad y facilidad de uso. Asimismo, los usuarios destacaron que no sufrieron un exceso de fatiga, lo cual permite utilizar la aplicación durante un largo periodo de tiempo sin experimentar cansancio visual. Algunos usuarios manifestaron estar ligeramente de acuerdo con que se encontraban satisfechos por finalizar las sesiones de evaluación. Esto indica que la participación les suponía un esfuerzo que debe tenerse en cuenta a la hora de planificar y diseñar el contenido y duración de las sesiones. También cabe destacar que los usuarios EM demandaron mayor velocidad en la aplicación. Sin

embargo, este aspecto se encuentra directamente relacionado con la calidad del clasificador. Un clasificador más robusto es capaz de obtener mayores precisiones con un menor número de secuencias y, por ende, de aumentar la velocidad del sistema.

La Tabla 2 muestra una comparación entre navegadores web BCI desarrollados con anterioridad y el presente estudio. A pesar de que el etiquetado de nodos hace que el navegador propuesto sea más rápido y autónomo que otros estudios previos [1,3], la mayor ventaja radica en la asincronía de la aplicación. El uso del umbral de atención del usuario evita el modo de lectura rígido de otras aproximaciones [7,10], así como la necesidad de supervisión constante [1,3]. Dicho umbral permite a los usuarios experimentar una navegación libre de restricciones mientras el sistema detecta las intenciones del usuario basándose en su atención.

Asimismo, las diferencias obtenidas entre los resultados de los usuarios SC y EM sugieren que la razón radica en los síntomas de la enfermedad. Se ha observado un rendimiento del clasificador muy variable para los sujetos EM. Aun así, la precisión alcanzada por los usuarios EM (84,14%) es mayor a la alcanzada por los usuarios de ELA en otros estudios [1,3,7]. De hecho, se han encontrado diferencias significativas entre los resultados de nuestro trabajo y las precisiones reportadas por Mugler et al. [7] (p -valor = 0.0193, Mann-Whitney U -Test). Aunque hay que tener cuidado al comparar ambas enfermedades, las precisiones obtenidas muestran una precisión general más alta que en los estudios previos. Asimismo, el daño cognitivo que se presenta en los enfermos EM no suele presentarse en los enfermos de ELA, puesto que el daño neurológico de estos últimos se centra principalmente en las neuronas motoras. Por esta razón, se propone evaluar la aplicación con enfermos de ELA como una línea futura de la investigación. En la misma línea que lo anterior, las precisiones alcanzadas por los usuarios SC (95,75%) también son ligeramente superiores a las reportadas en estudios previos, aunque no supone una diferencia significativa (p -valor > 0.05, Mann-Whitney U -Test) [7,10,13]. Los resultados obtenidos, por tanto, indican que el uso del umbral desarrollado puede ser una contribución importante para futuros sistemas BCI asíncronos, proveyendo al usuario de un control total de la aplicación.

A pesar de que los resultados sugieren que el navegador web BCI desarrollado es adecuado para su uso por parte de personas con grave discapacidad, podemos destacar una serie de limitaciones. La mayor limitación radica en la gran variabilidad del rendimiento del clasificador entre usuarios y sesiones. La robustez del sistema se vería aumentada si se redujese esta variabilidad, por ejemplo, empleando técnicas de extracción y clasificación de

Tabla 2. Comparación entre navegadores web BCI anteriores y el presente estudio.

Artículo	Señal de control	Tipo de señal	Funcionalidades		Evaluación		
			Selección enlaces	Asincronía	Sujetos	Precisión media	
Karim <i>et al</i>	SCPs	Endógena	Árbol dicotómico	Supervisión	1	ELA	80,00%
Bensch <i>et al</i>	SCPs o SMR	Endógena	Árbol dicotómico	Supervisión	4	ELA	-
					2	SC	-
Mugler <i>et al</i>	P300	Exógena	Etiquetado de nodos	Modo lectura	3	ELA	72,00%
					10	SC	93,40%
Blasco <i>et al</i>	P300	Exógena	Cursor	Modo lectura	4	SC	93,00%
Yu <i>et al</i>	P300 y SMR	Ambos	Cursor	-	7	SC	93,21%
Presente estudio	P300	Exógena	Etiquetado de nodos	Umbral de atención	16	EM	84,14%
					5	SC	95,75%

SCPs: Potenciales Corticales Lentos (*Slow Cortical Potentials*), SMR: Ritmos Sensoriomotores (*Sensori-Motor Rhythms*), ELA: Esclerosis Lateral Amiotrófica, SC: Sujetos de Control, EM: Esclerosis Múltiple

características más adecuadas [8]. Adicionalmente, el umbral asíncrono que monitoriza la atención del usuario se calcula directamente sobre los *scores* retornados por SWLDA y, por tanto, depende del clasificador empleado. Otra limitación a solventar en una futura versión es la imposibilidad de alternar entre mayúsculas y minúsculas, esencial para rellenar formularios. Asimismo, aunque hemos incluido una gran cantidad de símbolos, la inclusión de otra matriz adicional con el resto podría contribuir a acceder a cualquier página web desde la barra de direcciones.

4 CONCLUSIONES

Este estudio se ha centrado en proponer el uso de un navegador web BCI basado en potenciales evocados P300 para personas con grave discapacidad. El sistema procesa la señal EEG del usuario mediante un paradigma *odd-ball* visual compuesto por dos matrices distintas, que contienen comandos de navegación y caracteres alfanuméricos. Los comandos seleccionados por el usuario en tiempo real se envían a una extensión de *Google Chrome*, que ofrece realimentación al usuario. El navegador se ha evaluado sobre una población de 5 usuarios SC y 16 usuarios EM. Los resultados sugieren que el navegador es capaz de permitirles navegar por Internet de manera sencilla, rápida y autónoma. Las precisiones medias obtenidas por los usuarios SC y EM (95,75% y 84,14%, respectivamente) son superiores a las indicadas en estudios previos. De hecho, se han encontrado diferencias significativas en el aumento de precisión con respecto a otros estudios para la población enferma (p -valor = 0.0193). Por lo tanto, los resultados indican que el umbral de control asíncrono, así como el navegador web BCI en general, son una contribución útil para los usuarios con grave discapacidad motora, capaz de facilitar su integración social, aumentar su autonomía y, por ende, su calidad de vida.

Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado parcialmente mediante el proyecto TEC2014-53196-R del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y FEDER, así como el proyecto DPI2015-69098-REDT “NEUROTEC – Red Temática de Investigación en Neurotecnologías para la Asistencia y la Rehabilitación”. También ha sido financiado parcialmente por el Centro de Referencia Estatal de Discapacidad y Dependencia del IMSERSO. V. Martínez-Cagigal se encuentra financiado por un contrato de “Promoción de Empleo Joven e Implantación de la Garantía Juvenil” del MINECO y la Universidad de Valladolid.

Referencias

- [1] M. Bensch, A. a Karim, J. Mellinger, T. Hinterberger, M. Tangermann, M. Bogdan, W. Rosenstiel, N. Birbaumer, Nessi: An EEG-Controlled Web Browser for Severely Paralyzed Patients., *Comput. Intell. Neurosci.* 2007 (2007) 71863.
- [2] L.A. Farwell, E. Donchin, Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials, *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 70 (1988) 510–523.
- [3] A.A. Karim, T. Hinterberger, J. Richter, J. Mellinger, N. Neumann, H. Flor, A. Kubler, N. Birbaumer, Neural Internet: Web Surfing with Brain Potentials for the Completely Paralyzed, *Neurorehabil. Neural Repair.* 20 (2006) 508–515.
- [4] D.J. Krusienski, E.W. Sellers, F. Cabestaing, S. Bayoudh, D.J. McFarland, T.M. Vaughan, J.R. Wolpaw, A comparison of classification

- techniques for the P300 Speller., *J. Neural Eng.* 3 (2006) 299–305.
- [5] D.J. Krusienski, E.W. Sellers, D.J. McFarland, T.M. Vaughan, J.R. Wolpaw, Toward enhanced P300 speller performance, *J. Neurosci. Methods.* 167 (2008) 15–21.
 - [6] J. Mankoff, A. Dey, U. Batra, M. Moore, Web accessibility for low bandwidth input, *Proc. Fifth Int. ACM Conf. Assist. Technol.* (2002) 17–24.
 - [7] E.M. Mugler, C. a. Ruf, S. Halder, M. Bensch, A. Kübler, Design and implementation of a P300-based brain-computer interface for controlling an internet browser, *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* 18 (2010) 599–609.
 - [8] A. Pinegger, J. Faller, S. Halder, S.C. Wriessnegger, G.R. Müller-Putz, Control or non-control state: that is the question! An asynchronous visual P300-based BCI approach., *J. Neural Eng.* 12 (2015) 014001.
 - [9] G. Schalk, D.J. McFarland, T. Hinterberger, N. Birbaumer, J.R. Wolpaw, BCI2000: A general-purpose brain-computer interface (BCI) system, *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 51 (2004) 1034–1043.
 - [10] J.L. Sirvent Blasco, E. Iáñez, A. Úbeda, J.M. Azorín, Visual evoked potential-based brain-machine interface applications to assist disabled people, *Expert Syst. Appl.* 39 (2012) 7908–7918.
 - [11] J.R. Wolpaw, N. Birbaumer, D.J. McFarland, G. Pfurtscheller, T.M. Vaughan, Brain-computer interfaces for communication and control, *Clin. Neurophysiol.* 113 (2002) 767–91.
 - [12] World Health Organization, Atlas: Multiple sclerosis resources in the world, Vasa. (2008).
 - [13] T. Yu, Y. Li, J. Long, Z. Gu, Surfing the internet with a BCI mouse, *J. Neural Eng.* 9 (2012) 036012.

ESTRATEGIAS DE NEUROESTIMULACIÓN TRANSCRANEAL POR CORRIENTE DIRECTA PARA MEJORA COGNITIVA

Silvia Moreno, Mario Ortiz, José M. Azorín
Brain-Machine Interface Systems Lab. Universidad Miguel Hernández de Elche
Avda. de la Universidad s/n 03202, Elche España
silvia.moreno02@goumh.umh.es

Resumen

La estimulación transcraneal de corriente directa (tDCS, transcranial Direct Current Stimulation), una forma no invasiva de estimulación cerebral, ha sido investigada en diversos estudios como un método para mejorar la memoria de trabajo, la atención o inducir alguna mejora en enfermedades cognitivas. En el siguiente artículo se analizan los principales trabajos en este campo, estudiando, entre otros aspectos, las estrategias empleadas de estimulación y los efectos de mejora cognitiva tanto en sujetos sanos como pacientes con diversas patologías.

Palabras Clave: neuroestimulación, tDCS, memoria de trabajo, atención, mejora cognitiva.

1 INTRODUCCIÓN

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el 15% de la población mundial presenta algún tipo de discapacidad. La estimulación transcraneal de corriente directa (tDCS, transcranial Direct Current Stimulation) constituye un método no invasivo, de bajo coste y fácil de utilizar capaz de modificar la excitabilidad cerebral [1], y por tanto, capaz de mejorar la vida de estas personas. Durante los últimos años se han llevado a cabo diversas investigaciones en relación a esta técnica, no sólo en casos relacionados con la rehabilitación motora [15], sino que también está tomando importancia su intervención en procesos que inducen a una mejora cognitiva. De esta manera, debe tenerse en cuenta también que este último tipo de estimulación aplicada sobre el córtex prefrontal dorsolateral (DLPFC, dorsolateral prefrontal cortex) o sobre alguna zona relacionada con la memoria de trabajo, podría ser suministrada a adultos sanos con la finalidad de acelerar el aprendizaje o mejorar el rendimiento en entornos militares o educativos.

El objetivo de este artículo es mostrar las estrategias que han sido seguidas en algunas de las

investigaciones relacionadas con la mejora cognitiva anteriormente mencionadas, atendiendo así al tipo de estimulación utilizada, la duración de esta misma, la densidad de corriente suministrada y la localización de los electrodos entre otras características. Con todo ello, se pretende aunar la información necesaria para la realización de futuras investigaciones.



Figura 1: Dispositivo de neuroestimulación tDCS (Neuroelectrics).

2 ESTIMULACIÓN TRANSCRANEAL DE CORRIENTE DIRECTA

La tDCS constituye un tipo de estimulación eléctrica no invasiva en la que se aplica una intensidad de manera constante. Sus efectos se basan en los principios de plasticidad neuronal y neuromodulación. Las células nerviosas presentan propiedades electroquímicas por las cuales es posible disminuir o aumentar su excitabilidad y de esta manera cambiar su comportamiento. Dicho de otra manera, cuando las neuronas perciben un tipo de corriente lo suficientemente elevada como para hiperpolarizar sus dendritas, se produce un efecto de despolarización en el soma, dando lugar a un aumento de la excitación o la plasticidad.

Por otra parte, la excitación tiene lugar al localizar un electrodo como ánodo y otro como cátodo sobre el

cuero cabelludo. Se ha de suministrar una intensidad de corriente a partir de un dispositivo de estimulación (figura 1) lo suficientemente elevada durante un tiempo óptimo cuando el sujeto en cuestión realiza alguna actividad asociada a la zona del cerebro donde se encuentra el ánodo. Por tanto, se han de tener en cuenta parámetros como la densidad de corriente utilizada, la duración de la neuroestimulación, la repetitividad de las tareas y los tiempos de descanso entre sesiones.

3 ESTRATEGIAS BASADAS EN TDCS PARA MEJORA COGNITIVA

A continuación, se presenta un breve resumen cronológico sobre algunos estudios que se han realizado respecto a la tDCS para mejora cognitiva y una tabla (tabla 1) con el contenido de las principales características de cada uno de ellos.

En [7] se empleó estimulación por corriente directa anódica con la finalidad de mejorar la memoria de trabajo. En las pruebas experimentales participaron 15 sujetos sanos. Se realizaron dos sesiones de tDCS sobre el DLPFC izquierdo y Sham. Seis meses después, se realizaron otras dos sesiones de control (tDCS anódica de la corteza primaria motora M1, tDCS catódica del DLPFC o estimulación Sham, de manera aleatoria). El cátodo se situó sobre la región supraorbital contralateral.

Por otra parte, la estimulación fue llevada a cabo durante 10 minutos con una densidad de corriente de 0.029 mA/cm^2 . Durante los primeros 5 minutos los sujetos se encontraron en reposo y durante los últimos 5 realizaron una prueba basada en la aparición de letras ("3-back working memory test"). Se llegó a la conclusión de que la tDCS anódica en el DLPFC conduce una mejora en la memoria de trabajo respecto a la estimulación Sham de la misma área.

En esta ocasión, en [3], los efectos de la tDCS sobre la memoria de trabajo fueron probados en 18 enfermos de Parkinson durante tres sesiones (tDCS anódica del DLPFC F3, de la corteza primaria motora M1 o estimulación Sham) con una separación de dos días. El cátodo, al igual que en el anterior caso, fue situado en la región supraorbital contralateral.

En cuanto a la densidad de corriente utilizada, podemos decir que los sujetos fueron separados en dos grupos. A la mitad de los sujetos se les aplicó 0.029 mA/cm^2 mientras que al resto, se les aplicó 0.057 mA/cm^2 . Las sesiones tuvieron una duración de 20 minutos. En los primeros 15 los sujetos se

encontraron en reposo, mientras que en los últimos 5 minutos realizaron la tarea anteriormente mencionada, "3-back working memory test". Se pudo concluir que la memoria de trabajo en enfermos de Parkinson tras aplicar tDCS anódica sobre el DLPFC mejora a 2 mA pero no a 1 mA.

A su vez, en la investigación [2] formaron parte 26 sujetos con desórdenes mentales depresivos. El objetivo fue mejorar sus síntomas aplicando tDCS. A 12 de ellos se les aplicó tDCS sobre el DLPFC (F3, Sistema Internacional 10/20 de EEG), a otros 7 se les administró tDCS sobre el cortex occipital, mientras que al último grupo de 7 sujetos se les aplicó estimulación Sham. Al igual que anteriormente, el cátodo se posicionó sobre la región supraorbital derecha.

En relación al método seguido en cada sesión, los pacientes realizaron tareas afectivas de acierto o fallo ("go-no-go tasks") previamente y posteriormente a los 20 minutos de estimulación, con una densidad de corriente de 0.057 mA/cm^2 . Se concluyó que la tDCS anódica del DLPFC produce mejoras en este tipo de tareas. También se verificó que, tras 10 días, los efectos de la estimulación desaparecieron.

Por otra parte, el estudio [6] tuvo como finalidad confirmar que los efectos de la tDCS mejoran si existe aprendizaje. Se llevó a cabo gracias a la participación de 17 sujetos sanos, de los cuales, 13 se sometieron a una tarea de tipo Sternberg antes y después de aplicar tDCS sobre el cerebelo. De éstos, 5 sujetos llevaron a cabo la misma tarea un mes después, antes y después de aplicar tDCS sobre el DLPFC (entre las posiciones Fp1-F3 y Fp2-F4 Sistema Internacional 10/20 de EEG).

Asimismo, el experimento constó de seis sesiones en total, tres sesiones (tDCS anódica, catódica y sham), una por semana para tDCS del DLPFC y tDCS del cerebelo con una separación de un mes. El cátodo fue situado sobre el músculo deltoides derecho y la densidad de corriente utilizada fue de 0.095 mA/cm^2 . La conclusión final fue que las tDCS anódica y catódica sobre el cerebelo no contribuyen a la disminución del tiempo de reacción inducido al repetir una tarea sin aplicar tDCS. Sin embargo, la tDCS aplicada sobre el DLPFC, la estimulación catódica provoca una evidente disminución del tiempo de reacción 5 minutos después de haber finalizado, mientras que la estimulación anódica no presenta ningún efecto.

En cuanto al estudio [12], se compararon los efectos de la tDCS y tRNS (transcranial Random Noise) sobre el DLPFC. En él, participaron 10 sujetos sanos, a los que se les aplicó tDCS anódica sobre el DLPFC

(F3, Sistema Internacional 10/20 de EEG), tRNS y tDCS Sham de manera aleatoria durante las tres sesiones de 10 minutos a las que asistieron. El cátodo fue posicionado en la región supraorbital contralateral.

Durante la estimulación, los sujetos realizaron tareas de tipo Sternberg, mientras que previamente y posteriormente a ésta, desarrollaron diferentes tareas de la batería CogState. La densidad de corriente administrada fue de 0.029 mA/cm^2 . El análisis estadístico no reveló ningún efecto significativo al aplicar tDCS anódica salvo en el caso en el que se estaba efectuando la tarea “2-back working memory” de la batería CogState.

En esta ocasión, en la investigación [1], el objetivo fue aplicar tDCS anódica sobre el DLPFC con la finalidad de mejorar la memoria de trabajo participaron 10 sujetos sanos durante tres sesiones en las que se suministraron tDCS anódica del DLPFC (F3, Sistema Internacional 10/20 de EEG) y estimulación Sham durante la realización de una tarea de tipo “n-back”, así como tDCS anódica previamente a ésta, durante 10 minutos. El cátodo fue colocado sobre la región supraorbital contralateral.

La estimulación se aplicó con una intensidad de corriente de 0.029 mA/cm^2 y tras el análisis estadístico se concluyó que la tDCS anódica sobre este lugar durante la realización de una tarea relacionada con la memoria de trabajo mejora los efectos de esta misma.

El experimento [18] se realizó con la intención de comparar la tDCS anódica con la catódica sobre el DLPFC y fue posible gracias a la colaboración de 32 sujetos sanos. 16 de estos sujetos realizaron una tarea “2-back working memory task” en dos sesiones distintas en las que se les aplicó tDCS anódica y catódica sobre el DLPFC (F3, Sistema Internacional 10/20 de EEG). El cátodo se situó sobre el mastoides izquierdo.

En cuanto a las sesiones, tuvieron una duración de 15 minutos y la densidad de corriente utilizada fue de 0.029 mA/cm^2 . El análisis de los resultados condujo a la conclusión de que la tDCS anódica mejora la memoria de trabajo y la catódica la empeora.

Asimismo, en el estudio [17], se investigó sobre el rol de la densidad de corriente durante la tDCS. En él participaron 14 sujetos sanos. A cada uno de ellos se le aplicó tDCS anódica del DLPFC (F3, Sistema Internacional 10/20 de EEG) a 0.1 mA , a 2 mA y estimulación Sham en tres sesiones distintas. El cátodo fue situado sobre la región supraorbital contralateral.

Por otra parte, las sesiones tuvieron una duración de 20 minutos y las densidades corriente utilizadas fueron de 0.029 y 0.057 mA/cm^2 . Los sujetos recibieron estimulación durante toda la sesión y en los periodos 10-15 y 15-20 minutos realizaron una tarea “3-back”. Se verifica la hipótesis de que la tDCS anódica mejora la memoria de trabajo de manera dependiente al tiempo y a la intensidad aplicada. Los sujetos reaccionaron con mayor rapidez y exactitud cuando la estimulación fue de 2 mA de intensidad durante los últimos 5 minutos.

En la investigación [5] se estudió el impacto de la tDCS durante el aprendizaje. En el experimento participaron 22 sujetos sanos a los que se les suministró 2 mA de tDCS anódica sobre el DLPFC (F3, Sistema Internacional 10/20 de EEG) y 13 a que recibieron la misma estimulación pero a 0.1 mA . El cátodo se localizó en la parte superior del brazo izquierdo.

En cuanto a las 3 sesiones que realizaron dichos sujetos (entrenamiento, realización de la tarea DARWARS durante la estimulación, realización de esta misma una hora después de la estimulación), tuvieron una duración de 30 minutos y se utilizaron unas densidades de corriente de 0.009 y 0.181 mA/cm^2 . Los participantes que recibieron 2 mA fueron más exactos en sus respuestas, por lo que este estudio prueba que existe una correlación significativa entre los cambios de comportamiento con aprendizaje y la densidad de corriente aplicada.

Por otro lado, en el estudio [11] se investigó sobre los efectos de la tDCS sobre el lóbulo parietal y la atención. Se llevó a cabo gracias a la participación de 12 sujetos sanos que recibieron tDCS anódica sobre el lóbulo parietal superior (P6, Sistema Internacional 10/20 de EEG) durante los 10 minutos previos a realizar un test de reconocimiento verbal en dos sesiones distintas. También participaron otros 12 sujetos, los cuales formaron parte del grupo de control. El cátodo fue situado sobre el lóbulo parietal inferior derecho (P3, Sistema Internacional 10/20 de EEG).

La densidad de corriente administrada fue de 0.040 mA/cm^2 y la conclusión a la que se llegó fue que la tDCS anódica aplicada en las regiones parietales podría modular el aprendizaje en tareas de memoria relacionadas con el reconocimiento verbal.

El experimento [9] tuvo como finalidad analizar los efectos de la tDCS sobre el DLPFC en relación a tareas de atención incorporando elementos para aumentar la distracción (interferencias) de los sujetos. Participaron 14 sujetos sanos que recibieron tDCS anódica del DLPFC (F3, Sistema Internacional 10/20 de EEG) durante la primera sesión de 10

minutos y tDCS Sham durante la segunda sesión. El cátodo se situó en la órbita derecha.

Cada sujeto fue estimulado con una densidad de corriente de 0.029 mA/cm^2 mientras realizaba una tarea de tipo Sternberg. Al finalizar dicha estimulación los sujetos continuaron realizando la tarea alrededor de 20 minutos más hasta finalizarla. Se comprobó que la memoria de trabajo mejora en dicha situación de estimulación si se tiene en cuenta la presencia de interferencias.

En cuanto al estudio [8], también se estudiaron los efectos de la tDCS sobre el DLPFC. Debe decirse que fue llevado a cabo gracias a la colaboración de 20 sujetos sanos que recibieron tDCS anódica del DLPFC (F3, Sistema Internacional 10/20 de EEG) durante la primera sesión de 10 minutos y tDCS Sham durante la segunda sesión. El cátodo se situó en la órbita derecha.

La densidad de corriente suministrada fue de 0.029 mA/cm^2 y cada sujeto fue estimulado previamente a la realización de un Test de Asociación Implícita. Se demostró que no se cumple la hipótesis de que la tDCS anódica mejore el sesgo en los resultados de este test.

En el experimento [4] se aplicó tDCS sobre el córtex temporal en pacientes con Alzheimer. En él formaron parte 10 sujetos enfermos de Alzheimer que participaron en tres sesiones de 30 minutos diferentes: tDCS anódica sobre el DLPFC (F3, Sistema Internacional 10/20 de EEG), tDCS anódica sobre el córtex temporal izquierdo (Left Temporal Cortex, LTC) (T7, Sistema Internacional 10/20 de EEG) y estimulación Sham. El cátodo fue situado sobre la órbita derecha y la densidad de corriente administrada fue de 0.029 mA/cm^2 .

En cuanto a las sesiones, cada sujeto realizó tareas de tipo Stroop, de reconocimiento visual y de intervalo de dígitos 10 minutos después de que comenzara la estimulación y hasta su fin. La conclusión a la que se llegó fue que se producen mejoras después de aplicar tDCS anódica tanto sobre la región temporal como sobre la prefrontal, sin embargo, no se observaron cambios significantes en las tareas relacionadas con la atención.

En el estudio [16] se realizó una investigación sobre la mejora de la memoria de trabajo después de aplicar tDCS a 28 sujetos con desórdenes mentales depresivos. A todos ellos se les aplicó durante 2 sesiones tDCS sobre el DLPFC (F3, Sistema Internacional 10/20 de EEG) y estimulación Sham. El cátodo se situó sobre el DLPFC derecho (F3, Sistema Internacional 10/20 de EEG) y la densidad de corriente suministrada fue de 0.080 mA/cm^2 .

Los sujetos realizaron tareas de tipo “n-back” antes de la estimulación y a los 15 minutos de haber empezado esta misma. Se comprobó que el rendimiento de la memoria de trabajo mejora al aplicar tDCS anódica mientras se realizan tareas de este tipo en pacientes con depresión.

En el experimento [10] colaboraron 18 sujetos sanos. A cada uno de ellos se le aplicó tDCS anódica del DLPFC (F3, Sistema Internacional 10/20 de EEG) a 1 mA, a 2 mA y estimulación Sham en tres sesiones distintas de 20 minutos. El cátodo fue situado sobre la región supraorbital contralateral. Las densidades de corriente administradas fueron de 0.029 y 0.057 mA/cm^2 .

En cada sesión, tras aplicar la estimulación, los sujetos procedieron a realizar tareas de tipo “n-back” durante 10 minutos mientras se grababan las señales EEG. Este estudio demostró que la tDCS anódica mejora la eficiencia del procesamiento cognitivo produciéndose los cambios más significativos a 1 mA.

En la investigación [14] participaron un total de 30 sujetos de edad avanzada con el objetivo de observar si la tDCS mejoraba la memoria de trabajo en esta población. A cada uno de ellos se le aplicó tDCS anódica del DLPFC (F3, Sistema Internacional 10/20 de EEG) a 1 mA, a 2 mA y estimulación Sham en tres sesiones distintas de 25 minutos. El cátodo fue situado sobre la región supraorbital contralateral. Las densidades de corriente administradas fueron de 0.029 , 0.057 , 0.01 y 0.02 mA/cm^2 .

Durante cada sesión los participantes realizaron en seis ocasiones tareas de tipo “n-back”: antes de la estimulación, durante los 5 primeros minutos de estimulación, durante los minutos 10 -15 y 20-25 de esta misma, y después de aplicarla, durante los minutos 5-10 y 30-35. Los resultados sugirieron que una única sesión de tDCS en el DLPFC es improbable que mejore la memoria de trabajo en personas de edad avanzada.

En el experimento [13] el objetivo fue analizar los efectos de la tDCS al realizar una batería multitarea. Participaron 10 sujetos sanos que recibieron tDCS anódica del DLPFC (F3, Sistema Internacional 10/20 de EEG) y otros 10 a los que se les aplicó estimulación Sham durante una sesión de 30 minutos. El cátodo se posicionó en la parte superior del brazo derecho. Las densidades de corriente administradas fueron de 0.029 y 0.057 mA/cm^2 .

Los sujetos recibieron la estimulación mientras utilizaban la “Multi Attribute Task Battery” (MATB). Se pudo concluir que la tDCS anódica

mejora de manera significativa la capacidad de procesamiento de información de los participantes.

4 DISCUSIÓN

Al analizar y comparar los estudios anteriormente descritos, se puede decir que en la mayoría de ellos se ha demostrado que la tDCS anódica del DLPFC izquierdo conduce a una mejora de la memoria de trabajo respecto a la estimulación Sham de la misma área. Al aplicar este tipo de estimulación sobre la zona anteriormente mencionada, observamos que la posición utilizada habitualmente para colocar el ánodo es F3 (Sistema Internacional 10-20 EEG) [3] [2] [12] [1] [18] [17] [8] [16] [10] mientras que la del cátodo, ha sido el área supraorbital contralateral [7] [3] [2] [12] [1] [17] [9] [8] [4] [10] [14]. También deben ser mencionados los casos en los que el ánodo ha sido situado en el cerebelo [6], no obteniéndose contribuciones claras, el hueso esfenoides derecho

[17], el lóbulo parietal superior [5] o el córtex temporal izquierdo [11], dónde sí se produjeron efectos beneficiosos en cuanto a mejora cognitiva.

Por otra parte, atendiendo en esta ocasión a la relación de dependencia existente entre la tDCS, la densidad de corriente y tiempo de estimulación que debe aplicarse, caben ser mencionados estudios como el detallado en [3], que demuestran que se produce una mejora tras aplicar una estimulación anódica sobre el DLPFC de 2 mA mientras que no se percibe ninguna contribución al aplicar 1 mA durante el mismo periodo de tiempo. Por su parte, el artículo descrito en [17], verifica del mismo modo la dependencia del tiempo de estimulación. También, han de mencionarse [5] [4] [16] [13] donde se aplica un periodo de estimulación de 30 minutos (el más largo en comparación al resto de estudios descritos) y aquellos en los que se han utilizado un número de usuarios en torno a 30 [2] [18] [5] [16].

Tabla 1: Principales características de los estudios relacionados con la tDCS para mejora cognitiva.

Referencia	Polaridad	Posición Ánodo	Posición Cátodo	Duración estimulación	Número sesiones	Número sujetos	Densidad corriente	Efectos
[7]	tDCS Anódica/ Catódica/ Sham	DLPFC izquierdo/ M1	Área Supraorbital contralateral	10 min	2	15	0.029 mA/cm ²	La tDCS anódica del DLPFC mejora la memoria de trabajo.
[3]	tDCS Anódica/ Catódica/ Sham	F3	Área Supraorbital derecha	20 min	3	18	0.029, 0.057 mA/cm ²	La tDCS anódica del DLPFC mejora la memoria de trabajo en pacientes con Parkinson a 2 mA.
[2]	tDCS Anódica/ Sham	F3	Área Supraorbital derecha	20 min	1	26	0.057 mA/cm ²	La tDCS anódica del DLPFC produce mejoras en tareas afectivas de acierto/fallo
[6]	tDCS Anódica/ Catódica/ Sham	Cerebelo/ Fp1-F3 y Fp2-F4	Músculo deltoideo derecho	15 min	6	17	0.095 mA/cm ²	La tDCS sobre el cerebelo no implica ninguna mejora cognitiva. La tDCS catódica abre el DLPFC disminuye el tiempo de reacción.
[12]	tDCS Anódica/ Sham/ tRNS	F3	Área Supraorbital contralateral	10 min	3	10	0.029 mA/cm ²	La tDCS anódica mejora el tiempo de reacción según el tipo de tarea.
[1]	tDCS Anódica/ Sham	F3	Área Supraorbital contralateral	10 min	3	10	0.029 mA/cm ²	La tDCS anódica aplicada mientras se ejercita la memoria de trabajo mejora los efectos.
[17]	tDCS Anódica/ Catódica/ Sham	F3	Mastoides izquierdo	15 min	2	32	0.029 mA/cm ²	La tDCS anódica del DLPFC mejora la memoria de trabajo. La catódica no.
[16]	tDCS Anódica/ Sham	F3	Área Supraorbital contralateral	20 min	3	14	0.029, 0.057 mA/cm ²	La tDCS anódica mejora la memoria de trabajo de manera dependiente al tiempo y a la intensidad.
[5]	tDCS Anódica	F10	Parte superior del brazo izquierdo	30 minutos	3	35	0.009, 0.181 mA/cm ²	Existe una correlación entre el aprendizaje y la densidad de corriente al aplicar la estimulación.

[11]	tDCS Anódica	P6	P3	10 min	2	24	0.040 mA/cm ²	La tDCS anódica sobre la región parietal podría modular el aprendizaje en tareas relacionadas con el reconocimiento verbal.
[9]	tDCS Anódica/Sham	DLPFC izquierdo	Órbita derecha	10 min	1	14	0.029 mA/cm ²	Si introducimos un factor adicional de interferencia, la tDCS mejora el tiempo de reacción.
[8]	tDCS Anódica/Sham	F3	Órbita derecha	10 min	2	20	0.029 mA/cm ²	La tDCS no mejora el sesgo en los resultados de IAT.
[4]	tDCS Anódica/Sham	F3/T7	Órbita derecha	30 min	3	10	0.029 mA/cm ²	La tDCS anódica produce mejoras sobre la región temporal y la prefrontal.
[15]	tDCS Anódica/Sham	F3	F4	30 min	2	28	0.080 mA/cm ²	La tDCS anódica mejora la memoria de trabajo en pacientes con depresión.
[10]	tDCS Anódica/Sham	F3	Área Supraorbital derecha	20 min	3	18	0.029, 0.057 mA/cm ²	La tDCS anódica mejora la eficiencia de procesamiento cognitivo a 1 mA.
[14]	tDCS Anódica/Sham	F3	Región Supraorbital contralateral	25 min	3	30	0.029, 0.057, 0.01, 0.02 mA/cm ²	Una única sesión de tDCS es improbable que mejore la memoria de trabajo en personas de edad avanzada.
[13]	tDCS Anódica/Sham	DLPFC izquierdo	Parte Superior del brazo derecho	30 min	1	20	0.029, 0.057 mA/cm ²	La tDCS anódica del DLPFC mejora la capacidad de procesamiento de información de los participantes.

Asimismo, encontramos estudios en los que también han sido procesadas las señales EEG durante la estimulación [18] y posteriormente a ésta [10]. En ellos quedó demostrado que se produce una amplificación de la oscilación en las bandas theta y alfa tras aplicar tDCS anódica sobre el DLPFC izquierdo.

En cuanto a las aplicaciones o test psicológicos utilizados con el fin de evaluar los procesos cognitivos, los más utilizados han sido las tareas de tipo Sternberg y los test “n-back”, por lo que podemos decir que han sido las aplicaciones con las que se han presentado los mejores resultados, aunque también caben ser destacadas las baterías de tareas como CogState, que permiten identificar los procesos cognitivos que más han sido afectados por la estimulación, es decir, nos permite diferenciar entre tareas relacionadas con la atención, la memoria o la lógica entre otras.

Por último, en cuanto al análisis estadístico de los resultados, la mayoría de los estudios han realizado ANOVAS de múltiples caminos atendiendo tanto al tipo de estimulación (Sham, tDCS anódica, tDCS catódica) como al tipo de corriente aplicada y los datos obtenidos al evaluar los procesos cognitivos de cada sujeto durante el desarrollo de una de las tareas o test psicológicos anteriormente mencionados

(tiempos de reacción y exactitud de las respuestas). Se han llevado a cabo ANOVAS tanto de varios caminos como de medidas repetidas. También se tuvieron en cuenta los distintos grupos de sujetos en los que fue dividido cada experimento con el fin de colocar en distintas posiciones el ánodo. Previamente, con la finalidad de normalizar las muestras, se realizó un preprocesamiento de los datos utilizando distintos tipos de aplicaciones o test, uno de ellos el test Shapiro-Wilk, utilizado habitualmente en experimentos de este tipo para contrastar la normalidad de un conjunto de datos. Posteriormente, tras aplicar las ANOVAS necesarias, se procedió a utilizar un test *post hoc* de comparaciones múltiples de tipo Bonferroni o Wilcoxon.

5 CONCLUSIONES

El tratamiento de la disfunción cognitiva sigue siendo una necesidad clínica insatisfecha hoy en día. De acuerdo a la Comisión Europea el número de personas con dificultades cognitivas asciende a 30 millones en Europa. En este documento, se han descrito diversos estudios sobre la utilización de tDCS con la finalidad de obtener mejora cognitiva tanto en personas sanas como en pacientes con Alzheimer, Parkinson o depresión, entre otras enfermedades. Centrándonos en esta información, podemos considerar la tDCS como un tratamiento

experimental en el que, al igual que con otros tratamientos médicos, no se puede asegurar un resultado del todo específico. Se puede observar como algunos pacientes mejoran con rapidez, mientras que otros lo hacen lentamente o incluso, en alguno de ellos no se percibe ningún tipo de mejoría.

Del análisis de dichos estudios, se puede concluir que la relación de dependencia entre la duración temporal de la estimulación y el grado de intensidad aplicada juega un papel fundamental durante el proceso de mejora cognitiva y que se debe investigar más en torno a ella. Por otra parte, se hace especial hincapié en aplicar la estimulación sobre el DLPFC para mejorar sobretodo la memoria de trabajo. No obstante, la mayoría de investigaciones se han basado en localizar el ánodo en la posición F3 del Sistema Internacional EEG 10-20. Podría resultar de interés para futuras investigaciones utilizar otras posiciones cercanas también al área Brodmann 10, así como elegir un grupo de sujetos que participe en cada una de las sesiones de estimulación para comprobar la mejora de un modo individual, ya que algunas de las investigaciones han separado a los usuarios según el tipo de estimulación aplicada. Otra idea interesante podría ser realizar test de coeficiente intelectual a los sujetos, con el fin de que no existan grandes diferencias en sus capacidades y los resultados sean más específicos. Asimismo, dichas investigaciones deberían de llevarse a cabo paralelamente con registros de EEG, ya que de esta manera los estudios no se basarían tan sólo en la obtención de datos de acierto/fallo en respuestas o tiempos de reacción.

Otro tema importante a tener en cuenta, es la duración de los efectos de la tDCS, siendo como máximo de algo más de dos horas tras su aplicación. Se han de buscar soluciones para mejorar estos tiempos o incluir alternativas. Un tratamiento con medicamentos como apoyo a la tDCS podría estar también indicado y ser eficaz, no obstante, han de tenerse en cuenta posibles riesgos o complicaciones. A su vez, este tipo de estimulación puede constituir un tratamiento que potencie la eficacia de otros tratamientos farmacológicos, facilitando reducir la dosis de los mismos.

Según la OMS, para el año 2050 se incrementará en un 73% el número de personas mayores de 65 años en los países industrializados. Un cerebro de esta madurez podría cambiar físicamente en respuesta a un programa de entrenamiento cognitivo y a la tDCS, modificando de esta manera su corteza cerebral y en definitiva, disminuyendo el deterioro cognitivo y la limitación de la capacidad para la vida independiente y autosuficiente. Por todo ello, la investigación sobre esta técnica de neuroestimulación eléctrica es de una gran importancia.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido realizada en el marco del proyecto Associate - Decodificación y estimulación de actividad cerebral sensorial y motora para permitir potenciación a largo plazo mediante estimulación Hebbiana y estimulación asociativa pareada durante la rehabilitación de la marcha (con referencia DPI2014-58431-C4-2-R), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (Plan Estatal de I+D+I) y por la Unión Europea a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional - FEDER "Una manera de hacer Europa". Además, se agradece a la Universidad Miguel Hernández de Elche el apoyo a S. Moreno a través del programa para la realización de prácticas en actividades de fomento de la investigación en los Departamentos e Institutos Universitarios de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

Referencias

- [1] Andrews, Hoy, et al. (2011), "Improving working memory: the effect of combining cognitive activity and anodal transcranial direct current stimulation to the left dorsolateral prefrontal cortex", *Brain Stimulation*.
- [2] Boggio, Bormpohl, et al. (2007), "Go-no-go task performance improvement after anodal transcranial DC stimulation of the left dorsolateral prefrontal cortex in major depression", *Journal of Affective Disorders*.
- [3] Boggio, Ferruci, et al. (2006), "Effects of transcranial direct current stimulation on working memory in patients with Parkinson's disease", *Journal of the Neurological Sciences*.
- [4] Boggio, Khoury, et al. (2012), "Temporal cortex direct current stimulation enhances performance on visual recognition memory task in Alzheimer disease", *J Neurol Neurosurg Psychiatry*.
- [5] Coffman, Trumbo, et al. (2012), "Impact of tDCS on performance and learning of target detection: Interaction with stimulus characteristics and experimental design", *Neuropsychologia*.
- [6] Ferruci, Marceglia, et al. (2008), "Cerebellar transcranial direct current stimulation impairs the practice-dependent proficiency increase in working memory", *Journal of Cognitive Neuroscience*.

- [7] Fregni, Boggio, et al. (2005), “Anodal transcranial direct current stimulation of prefrontal cortex enhances working memory”, *Experimental Brain Research*.
- [8] Gladwin, den Uyl, et al. (2012), “Anodal tDCS of dorsolateral prefrontal cortex during an Implicit Association Test”, *Neuroscience Letters*.
- [9] Gladwin, den Uyl, et al. (2012), “Enhancement of selective attention by tDCS: Interaction with interference in a Sternberg task”, *Neuroscience Letters*.
- [10] Hoy, Emonson, et al. (2013), “Testing the limits: Investigating effect of tDCS dose on working memory enhancement in healthy controls”, *Neuropsychologia*.
- [11] Jacobson, Goren, et al. (2011), “Oppositional transcranial direct current stimulation (tDCS) of parietal substrates of attention during encoding modulates episodic memory”, *Brain Research*.
- [12] Mulquiney, Hoy, et al. (2011), “Improving working memory: Exploring the effect of transcranial random noise stimulation and transcranial direct current stimulation on the dorsolateral prefrontal cortex”, *Clinical Neurophysiology*.
- [13] Nelson, McKinley, et al. (2016), “The Effects of Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS) on Multitasking Thoughtput Capacity”, *Frontiers in Human Neuroscience*.
- [14] Nilsson, Lebedev and Lovdén (2015), “No significant Effect of Prefrontal tDCS on Working Memory Performance in Older Adults”, *Frontiers in Aging Neuroscience*.
- [15] Nitsche and Paulus (2000), “Excitability changes induced in the human motor cortex by weak transcranial direct current stimulation”, *The Journal of Physiology*.
- [16] Oliveira, Zanao, et al. (2012), “Acute working memory improvement after tDCS in antidepressant-free patients with major depressive disorder”, *Neuroscience Letters*.
- [17] Teo, Hoy, et al. (2011), “investigating the role of current strength in tDCS modulation of working memory performance in healthy controls”, *Frontiers in Psychiatry*.
- [18] Zaehle, Sandmann, et al. (2011), “Transcranial direct current stimulation of the prefrontal cortex modulates working memory performance: combined behavioural and electrophysiological evidence”, *BMC Neuroscience*.

COMPARATIVA DE ALGORITMOS PARA LA DETECCIÓN ONLINE DE IMAGINACIÓN MOTORA DE LA MARCHA BASADO EN SEÑALES DE EEG

M. Rodríguez-Ugarte¹, I.N. Angulo-Sherman², E. Iáñez¹, J.M. Azorín¹

¹Brain Machine Interfaces Systems Lab. Universidad Miguel Hernández de Elche

Avda de la Universidad s/n, 03202 Elche, España, {maria.rodriguez, eianez, mortiz, jm.azorin}@umh.es

² Center for Research and Advanced Studies (Cinvestav), iangulo@cinvestav.mx

Resumen

Las interfaces cerebro-máquina son cada vez más usadas para mejorar el proceso de rehabilitación de personas que han sufrido un accidente cerebrovascular. En este trabajo se comparan dos algoritmos para determinar cuál de ellos ofrece mayor precisión de manera online dos tareas mentales: imaginación de marcha y relajación. Ambos algoritmos detectan los cambios en la potencia a través de la desincronización y sincronización de eventos relacionados. El algoritmo 1 está basado en la media de las bandas de frecuencia 8-13 Hz y 20-35 Hz por cada electrodo. El algoritmo 2 se fundamenta en la potencia a la frecuencia de máxima variabilidad entre las dos tareas en cada electrodo. Los resultados indican que el algoritmo 2 ofrece mayor precisión que el algoritmo 1 en 4 de 5 usuarios.

Palabras clave: comparación algoritmos, imaginación marcha, EEG

1. INTRODUCCIÓN

La Sociedad Española de Neurología declaró que en los últimos 20 años, el número de casos que han sufrido un ictus o accidente cerebrovascular (ACV) entre 20 y 64 años ha aumentado un 25% [5]. Muchos de estos casos quedan con problemas motores en las extremidades inferiores. Por ello, se está investigando sobre cómo mejorar el proceso de rehabilitación de estas personas. Una técnica cada vez más común son las interfaces cerebro-máquina (Brain Computer interfaces, BCI, en inglés). Éstas presentan una conexión o comunicación alternativa entre el cerebro y las extremidades afectadas. En otras palabras, las BCI traducen las señales neuronales y las transforman en comandos para controlar un dispositivo externo, como por ejemplo un exoesqueleto [9].

Existen varios paradigmas para mejorar el proceso de rehabilitación de las personas que han sufrido un ACV. Entre los más comunes se encuentran: ejecución motora de la actividad (EM) e imaginación motora de la actividad (IM). EM se basa en la realización del movimiento que potencia la

rehabilitación del área afectada mientras que IM se fundamenta en la imaginación de la actividad motora sin llegar a ejecutarla [3]. Un estudio publicado por Ang [1], usando resonancia magnética funcional, comprobó que EM e IM activaban áreas similares del cerebro, entre ellas: corteza motora (M1), corteza premotora (PM), área motora suplementaria (AMS) y la corteza primaria somatosensorial (S1) [2].

Además, IM está relacionado con la atenuación de potencia en la electroencefalografía (EEG) y es comúnmente conocida como desincronización y sincronización de eventos relacionados (event-related desynchronization, ERD y event-related synchronization, ERS, en inglés) en la banda alpha (6-12 Hz) y beta (16-31 Hz) [4].

En este trabajo se van a estudiar dos tipos de algoritmos en una BCI para saber cuál ofrece mayor precisión a la hora de detectar de manera online dos tareas de imaginación: relajación e imaginación de marcha. Ambos tratan de detectar los cambios de potencia ERD/ERS pero en diferentes bandas de frecuencia. El algoritmo que mejores resultados obtenga, será utilizado para analizar la plasticidad de los usuarios en pruebas realizadas durante cinco días consecutivos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se van a explicar los materiales y métodos utilizados para determinar qué algoritmo de señales EEG ha de usar la BCI para obtener la mayor precisión a la hora de clasificar dos estados mentales: imaginación de marcha y relajación.

2.1. EXPERIMENTO

El experimento consiste en detectar tareas de relajación e imaginación de marcha. El usuario se situó a unos 80 cm de una pantalla que indicaba las instrucciones de la prueba (Figura 1). Cada sesión consta de 12 pruebas. Cada prueba consta de 10 bloques tanto de relajación como imaginación motora. Los bloques de relajación eran identificados por el usuario por la palabra «Relaja» y los de imaginación por la palabra «Imagina». La

duración de cada bloque de tarea dura entre 4 y 5.4 segundos siendo el orden de aparición aleatorio pero sin sobrepasar más de dos veces seguidas la misma tarea. Esto se ha realizado así para evitar que el usuario se espere qué tarea ha de realizar y que las señales EEG no adquieran una rutina. Entre los bloques de las tareas se presenta el símbolo + para que el usuario descanse. La secuencia temporal de una prueba puede verse en la Figura 2. Se avisó a los sujetos que durante los bloques de tareas parpadearan, tragarán o se movieran lo mínimo posible, pudiendo hacer dichos gestos preferiblemente durante el símbolo +, ya que dichos datos no se usan para realizar el análisis. Por lo tanto, una sesión dura entre 1.50 y 1.73 minutos. El total del experimento, entre la colocación del gorro, descanso entre pruebas y las pruebas en sí, duró sobre 1 hora.

2.2. SUJETOS

Cinco usuarios sanos entre 29 y 45 años (3 mujeres y 2 hombres) han participado en este estudio. Ninguno de ellos reportó tener enfermedades neuronales y todos dieron su consentimiento informado para realizar dichas pruebas. El estudio fue aprobado por el Comité Ético de la Oficina Evaluadora de Proyectos de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

2.3. ADQUISICIÓN DE SEÑALES EEG

Se ha utilizado el sistema StarStim 32 de Neuroelectrics para adquirir 30 señales EEG de acuerdo al Sistema Internacional 10/10 (FP1, FP2, AF3, AF4, F4, F3, FC6, FC2, FC1, FC5, FZ, C1, C3, CZ, C2, C4, P7, P4, PZ, P3, P8, O1, O2, OZ, PO4, CP6, CP2, CP1, CP5, and PO3) a una frecuencia de muestreo de 500 Hz. En términos de software, Neuroelectrics Instrument Controller (NIC) y la plataforma de Matlab, fueron usados para adquirir los datos mientras las rutinas en Matlab también controlaban las indicaciones visuales que se ofrecían al usuario.

2.4. ANALISIS SEÑALES EEG

Una vez obtenidas las señales EEG se procede a su análisis para extraer las características que mejor definan las dos tareas: imaginación motora del pedaleo y relajación. Se han realizado dos tipos de algoritmos: P1 está fundado en el cambio de potencia en la corteza motora de la banda μ (8-13) Hz y la banda 20-35 Hz y P2 basado en los cambios de potencia a la frecuencia, entre 6-30 Hz, que tienen máxima varianza entre las tareas para cada electrodo de la corteza motora. Ambos algoritmos tienen el inconveniente de que haya movimientos

involuntarios de cabeza o musculares. Sin embargo, las frecuencias asociadas a estos artefactos son rechazadas y la señal es tratada para evitarlos.

2.4.1. ALGORITMO P1

Este algoritmo está basado en [6] debido a los buenos resultados obtenidos en offline (precisión obtenida media para 3 usuarios del 70.8 %). La señal es procesada en ventanas de 1 segundo cada 0.2 segundos. Por cada ventana se seleccionan los canales Cz, Pz, Fz, FC1, FC2, CP1, CP2, C3 y C4 y se aplica un filtro Laplaciano a los nueve canales. Después, se procesan paralelamente dos filtros pasabanda de segundo orden: 8-13 Hz y 20-35 Hz. A continuación, para cada una de las bandas, las señales son elevadas al cuadrado. Luego, cada señal es suavizada asignando el valor medio de los últimos 8 segundos de la potencia espectral. Tal suavizado introduce variaciones lentas en la señal, por lo que posteriormente se quitó la tendencia lineal de los últimos 8 segundos. Tras haber eliminado la tendencia lineal, se calcula la media de la última ventana, obteniendo la característica buscada. Este algoritmo utiliza 18 características en total por cada ventana procesada (2 características por electrodo debido a que hay dos bandas de frecuencia).

2.4.2. ALGORITMO P2

Este algoritmo está basado en [7] por los buenos resultados obtenidos offline (precisión obtenida media para 5 usuarios del 77 %). En este algoritmo, la señal también es procesada en ventanas de 1 segundo cada 0.2 segundos. Para los 30 canales adquiridos se realiza un filtro Butterworth paso alto de cuarto orden con frecuencia de corte 0.05 Hz. Posteriormente se usa un filtro notch a 50 Hz para quitar la señal eléctrica y luego se utiliza un filtro Butterworth de cuarto orden paso bajo con frecuencia de corte 45Hz. Después se aplica un filtro Laplaciano y se seleccionan los canales de salida: Cz, CP1, CP2, C1, C2, C3, C4, FC1 y FC2. A continuación se busca por cada electrodo, la frecuencia entre 6 y 30 Hz que obtenga máxima diferencia de potencia entre las dos tareas, y la denominamos frecuencia óptima. Seguidamente se calcula la potencia de cada electrodo a su frecuencia óptima. Este procesamiento utiliza 9 características en total por cada ventana procesada.

2.4.3. CLASIFICADOR

Las señales procesadas de las primeras 4 pruebas fueron utilizadas para entrenar el clasificador. Para el procesamiento P1, se usó un clasificador Bayesiano ingenuo para identificar MI y la relajación. Para el procesamiento P2, se utilizó un clasificador



Figura 1: Montaje experimental para la realización del experimento. La pantalla situada enfrente del usuario da instrucciones acerca de la tarea que debe de realizar. Mientras, se están adquiriendo las señales EEG.

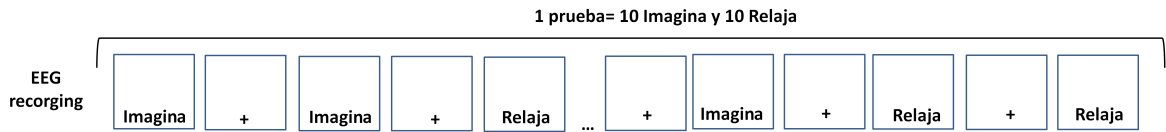


Figura 2: Representación temporal del protocolo. El orden de aparición de Imagina y Relaja es aleatorio sin que una tarea se repita más de dos veces consecutivas.

máquina soporte vectorial (Support Vector Machine, SVM, en inglés) con un kernel de función de base radial. Cada procesamiento tiene distinto clasificador debido a que se habían probado de esta manera offline consiguiendo una media de precisión para todos los usuarios de 70.8 % para P1 y del 77 % para el P2 en trabajos anteriores [6] y [7] respectivamente.

Posteriormente se realizaron 4 pruebas online alternativamente con cada uno de los dos procesamiento para testear la precisión de la clasificación, calculada como el porcentaje de clasificaciones correctas en una prueba. Para este tipo de pruebas, además de aparecer en la pantalla la palabra «Relaja» o «Imagina», aparecía una barra verde indicando la precisión con que estaba siendo ejecutada dicha tarea. Esta barra verde da realimentación positiva al usuario ya que no desciende si la tarea no es bien ejecutada.

Cuadro 1: Frecuencia óptima de cada electrodo del algoritmo 2 para los 5 usuarios (U1-U5)

	U1	U2	U3	U4	U5
CZ	18	17	21	25	28
CP1	29	18	6	25	10
CP2	9	16	6	27	30
C1	18	18	21	25	30
C2	19	17	6	6	28
C3	9	16	6	25	11
C4	9	11	6	25	29
FC1	10	18	6	27	29
FC2	9	17	12	25	28

Cuadro 2: Precisión (%) de las cuatro pruebas realizadas por el algoritmo 1 y 2 de los 5 usuarios (U1-U5)

	Rep	U1	U2	U3	U4	U5
P1	1	46.4	39.8	56.9	53.7	50.9
	2	45.5	56.3	44.9	56.6	45.0
	3	49.4	58.3	55.2	50.6	59.7
	4	44.3	38.8	52.3	49.7	57.4
P2	1	58.3	49.1	51.1	47.3	72.1
	2	52.6	58.9	61.0	44.6	81.2
	3	54.7	60.2	61.3	49.0	77.9
	4	50.9	59.3	61.0	50.8	70.8

3. RESULTADOS

La Tabla 1 muestra la frecuencia óptima por electrodos de todos los usuarios obtenida con el procesamiento 2. La diferencia de potencia a estas frecuencias entre las dos tareas es máxima para poder separar las clases más fácilmente.

La Tabla 2 muestra la precisión obtenida por cada sujeto con el procesamiento P1 y P2 de cada una de las pruebas realizadas. En ella, se puede apreciar si el usuario está aprendiendo a controlar la BCI comparando el resultado obtenido al iniciar los respectivos bloques de P1 y P2 con su finalización. Por otro lado, la Figura 3 representa la media de todas las pruebas por usuario, pudiendo observar cuál de los dos procesamientos consigue una mayor precisión.

4. DISCUSION

De los resultados anteriores de la Tabla 2 se puede observar que utilizando el procesamiento P1, sólo el sujeto 5 mejora (un 6,5%) respecto a la primera sesión. Sin embargo, para el procesamiento P2, los usuarios 2, 3 y 4 incrementan un 10.2%, 9.9% y 3.5% respectivamente. Comparando la precisión adquirida por cada usuario usando los dos procesamientos, parece ser que P2 obtiene mayor precisión para 4 de los 5 usuarios. Sólo el sujeto 4 presenta un incremento del 4.74% al utilizar el procesamiento P1. Los usuarios U1, U2 y U3 obtienen de media un 7.54% de mejora respecto a P1 mientras que U5 mejora un 22.3%, siendo éste el que mejor resultados obtiene en la sesión, llegando a sobrepasar el 80% en una de las pruebas. Por lo tanto, la uniformidad mostrada de la frecuencia óptima de los sujetos 2 y 4 de la Tabla 1 no representa ningún indicativo de cómo va a ser el clasificador de preciso.

La Figura 4 representa el espectro de frecuencias

a lo largo del tiempo del electrodo Cz del usuario 5. La línea roja representa la tarea que se está realizando. Cuando ésta es 27, el usuario está imaginando, mientras que cuando es 12, el sujeto está en al fase de relajación y el 0 representa el símbolo '+' indicando el cambio de tarea. En ella se puede ver el ERD/ERS que se produce cuando se realizan las tareas. Como era de esperar, cuando el sujeto está imaginando, se produce una atenuación de la potencia en el EEG mientras que cuando se encuentra en la tarea de relajación, se produce una sincronización de las ondas de EEG produciendo un aumento de potencia. Recordemos que el procesamiento 1 toma dos características por electrodo, la media elevado al cuadrado de las potencias entre 8-13 Hz y 20-35 Hz y el procesamiento 2 escoge la potencia a la frecuencia que mayor variación existe entre las tareas. Una posible explicación de por qué se obtiene mejores resultados con el procesamiento P2, puede verse en esta figura. El usuario 5, en esta prueba y usando el procesamiento 2, obtuvo en el electrodo Cz la frecuencia óptima de 28 Hz (Tabla 1). Por ello y fijándonos en la Figura 4, se ve que si se utiliza el procesamiento P1 en el electrodo Cz cuesta más realizar la separación entre clases que con el procesamiento 2, que se ve una clara distinción entre clases a la frecuencia de 28 Hz.

5. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo era desarrollar una BCI capaz de detectar con la mayor precisión dos tareas de imaginación: una tarea compleja motora, como es la marcha, y la relajación. Para ellos se han desarrollado dos algoritmos. Se ha visto que el procesamiento P2 ofrece más precisión que el P1 en 4 usuarios de 5, alcanzando uno de ellos una media del 75.5%. Este algoritmo se basa en obtener por cada usuario, la potencia a la frecuencia óptima de cada electrodo. Los resultados obtenidos no son muy elevados pero este procesamiento va a ser utilizado para ver la plasticidad adquirida durante cinco días, por lo que como punto de partida son buenos resultados.

Además, esta estrategia se va a probar en usuarios sanos aplicando estimulación transcranial por corriente continua (transcranial direct current stimulation, tDCS, en inglés). El tDCS es una técnica de neuromodulación que se utilizará para ver si mejora la plasticidad de los usuarios.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido realizada en el marco del proyecto Associate - Decodificación y estimulación de actividad cerebral sensorial y motora para permitir potenciación a largo plazo mediante

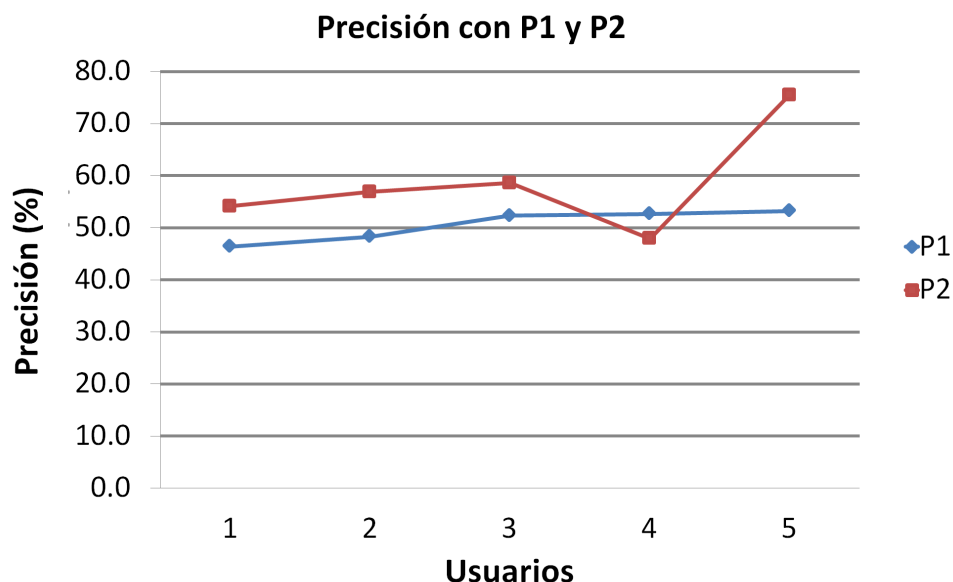


Figura 3: Precisión media por usuario utilizando el procesamiento 1 y 2.

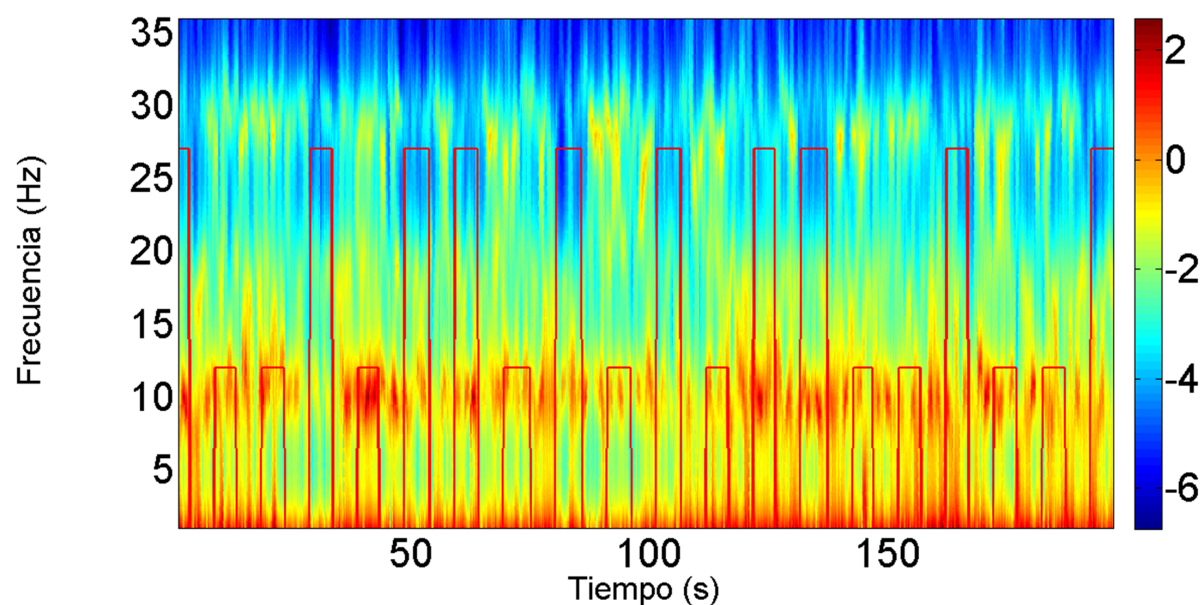


Figura 4: Espectro de frecuencias a lo largo del tiempo para el electrodo Cz del sujeto 5. La línea roja representa la tarea a realizar: 0 representa el “+” indicando el cambio de tarea, 12 el usuario se tenía que relajar, 27 el usuario imaginaba el pedaleo.

estimulación Hebbiana y estimulación asociativa pareada durante la rehabilitación de la marcha (con referencia DPI2014-58431-C4-2-R), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (Plan Estatal de I+D+I) y por la Unión Europea a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional - FEDER “Una manera de hacer Europa”.

Referencias

- [1] Ang, K. K., Guan, C., Chua, K. S. G., Ang, B. T., Kuah, C., Wang, C., Zhang, H. (2010, August). Clinical study of neurorehabilitation in stroke using EEG-based motor imagery brain-computer interface with robotic feedback. In Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2010 Annual International Conference of the IEEE (pp. 5549-

- 5552). IEEE.
- [2] Ang, K. K., Guan, C., Chua, K. S. G., Ang, B. T., Kuah, C. W. K., Wang, C., Zhang, H. (2011). A large clinical study on the ability of stroke patients to use an EEG-based motor imagery brain-computer interface. *Clinical EEG and Neuroscience*, 42(4), 253-258.
 - [3] Hanakawa, T., Immisch, I., Toma, K., Dimyan, M. A., Van Gelderen, P., Hallett, M. (2003). Functional properties of brain areas associated with motor execution and imagery. *Journal of Neurophysiology*, 89(2), 989-1002.
 - [4] Hanakawa, T. (2016). Organizing motor imageries. *Neuroscience research*, 104, 56-63.
 - [5] Pérez Menéndez, A., El 5 % de los españoles mayores de 65 años han tenido un ictus, [Online], <http://www.sen.es/saladeprensa/pdf/Link198>.
 - [6] Angulo-Sherman, I.N. , Rodríguez-Ugarte, M., Iáñez, E., Azorín, J.M. (2017). Classification of Gait Motor Imagery while Standing Based on Electroencephalographic Bandpower. 7th international work-conference on the interplay between natural and artificial computation (IWINAC). Aceptado.
 - [7] Rodríguez-Ugarte, M., Angulo-Sherman, I.N., Iáñez, E., Ortiz, M., Azorín, J.M. (2017). Offline and Pseudo-online Classification of Pedaling Imagery Based on Electroencephalographic Signals. IEEE international conference on systems, man, and cybernetics (SMC). Enviado
 - [8] Sitaram, R., Zhang, H., Guan, C., Thulasidas, M., Hoshi, Y., Ishikawa, A., Birbaumer, N. (2007). Temporal classification of multichannel near-infrared spectroscopy signals of motor imagery for developing a brain-computer interface. *NeuroImage*, 34(4), 1416-1427.
 - [9] Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., McFarland, D. J., Pfurtscheller, G., Vaughan, T. M. (2002). Brain-computer interfaces for communication and control. *Clinical neurophysiology*, 113(6), 767-791.

DETECCIÓN, MEDIANTE UN GUANTE SENSORIZADO, DE MOVIMIENTOS SELECCIONADOS EN UN SISTEMA ROBOTIZADO COLABORATIVO PARA HALS

Lidia Santos, José L. González, Eusebio de la Fuente, Juan C. Fraile, Javier P. Turiel.
ITAP - Instituto de las Tecnologías Avanzadas de la Producción, Universidad de Valladolid.
lidia.santos@uva.es ; {jossan, efuente, jcfraile, turriel}@eii.uva.es

Resumen

El uso de robots ha permitido importantes progresos en el campo de la cirugía laparoscópica convencional. Sin embargo, se ha prestado poca atención a la cirugía laparoscópica asistida a mano, una cirugía en la que el cirujano introduce la mano no dominante en el abdomen del paciente. El riesgo de colisión entre la mano del cirujano y la herramienta movida por el robot es un problema que ha de abordarse.

También ha habido un creciente interés en los wearables, lo que nos lleva a la aplicación de un guante sensorizado que colabora con un robot en este tipo de cirugía. El objetivo de este trabajo es analizar la información proporcionada por un guante sensorizado de los movimientos de la mano del cirujano para determinar las acciones que llevará a cabo el robot colaborativo.

La inclusión de un guante quirúrgico sensorizado en cirugía laparoscópica asistida por la mano (Hand Assisted Laparoscopic Surgery, HALS) dentro de un sistema colaborativo robotizado permitiría enviar información sobre movimientos específicamente seleccionados realizados por la mano del cirujano durante la intervención. Para ello han de definirse de forma unívoca ciertos movimientos de la mano que se han de identificar online para que el robot colaborativo realice las actividades pertinentes.

Palabras Clave: HALS (Hand Assisted Laparoscopic Surgery), cirugía laparoscópica asistida por la mano, guante de datos sensorizado, *wearable*, patrones de movimiento, sistema colaborativo.

1 INTRODUCCIÓN

La cirugía laparoscópica asistida por la mano (Hand Assisted Laparoscopic Surgery, HALS) es un tipo de cirugía laparoscópica en la que el cirujano introduce su mano no dominante en la cavidad abdominal del paciente, recuperando así el sentido del tacto y las habilidades para suturar y diseccionar con la mano, las cuales se habían perdido con la cirugía laparoscópica

tradicional [16] y dotando a esta cirugía de las ventajas de la cirugía abierta convencional y la cirugía laparoscópica [1, 7, 10, 15, 16]. La cirugía laparoscópica ha ido evolucionando e incluyendo nuevas herramientas para aportar una mayor estabilidad y precisión en los movimientos de los endoscopios [2, 3, 17], como la utilización de brazos quirúrgicos como el robot Da-Vinci o robots asistentes semiautónomos [4, 11]. También ofrece ventajas frente a la laparotomía como son hospitalizaciones más cortas, incisiones más pequeñas y menos pérdidas de sangre [5, 9].

Por otro lado, el creciente desarrollo de guantes sensorizados ha propiciado su utilización en diferentes ámbitos que abarcan desde la rehabilitación hasta la interpretación de la lengua de signos. [6]. Se propone, por tanto, la utilización de un guante sensorizado por parte del cirujano en operaciones de cirugía laparoscópica.

Este trabajo forma parte de un proyecto de investigación cuyo objetivo principal es el desarrollo de un sistema robotizado colaborativo para cirugía laparoscópica asistida por la mano. Como parte de este proyecto se considera el desarrollo e integración en el sistema de un guante quirúrgico sensorizado y un sistema de visión artificial. Para ello, se propone mejorar la funcionalidad del guante del cirujano, incluyendo diferentes sensores para la captación de la posición de la mano pudiendo así realizar operaciones en colaboración con robots quirúrgicos mediante un sistema colaborativo robotizado.

En cada instante, el guante quirúrgico sensorizado obtendrá la posición de la mano, que se define como la postura que adopta, es decir, el grado de flexión de cada dedo. A su vez, el sistema de visión determinará la localización de la punta de los dedos respecto a un eje de referencia determinado.

Los datos de posición y localización se utilizarán tanto para evitar colisiones con herramientas laparoscópicas, así como para generar un entorno de realidad aumentada con los datos de la cavidad abdominal del paciente y la mano del cirujano.

Por ello, en este artículo se plantea su utilización para la comunicación con un robot colaborativo en una cirugía laparoscópica asistida por la mano. Se espera que el sistema reconozca la fase actual de la intervención mediante la identificación de los movimientos de la mano del cirujano. Con esta información, los brazos robóticos actuarán de forma colaborativa con el cirujano y le asistirán con la herramienta articulada y ubicando el endoscopio y los mini-robots en las localizaciones adecuadas para proporcionar una visión completa y adecuada del campo quirúrgico, permitiendo realizar la cirugía con seguridad y precisión.

Para llevarlo a cabo se ha utilizado un guante de datos para poder analizar *online* los movimientos realizados por la mano que el cirujano introduce durante la operación en la cavidad abdominal del paciente. Se han definido diferentes movimientos teniendo en cuenta los movimientos que se realizan con la mano a analizar durante una cirugía HALS [13]. Dichos movimientos definidos no han de confundirse con movimientos realizados comúnmente durante la operación y servirán para generar comandos que, a través del sistema de control global, serán enviados al robot colaborativo para su ejecución durante la operación.

El guante sensorizado se ha considerado como un instrumento ideal para medir la cinemática de la mano en aplicaciones tales como la rehabilitación, la realidad virtual, la actuación musical, los videojuegos, la teleoperación y la robótica [6, 8, 12, 14].

En este estudio se ha usado un guante comercial, 5DT Data Glove, de 5 sensores, que se caracteriza por la utilización de sensores basados en fibra óptica con una resolución A/D de 12 bits. Viene provisto con un terminal USB para realizar la conexión con un PC por lo que se elimina la necesidad de una fuente de alimentación externa. El guante de 5 sensores posee un sensor por dedo por lo que proporciona un único dato para definir la posición de cada dedo colocado según podemos ver en la Figura 1.



Figura 1: Posición de los sensores en el guante 5DT de 5 sensores.

El programa de gestión del guante detecta el puerto USB en el que está conectado y comienza la inicialización del guante en la que se recogen los

valores del tipo de mano (derecha o izquierda) y el tipo de guante dependiendo del número de sensores que tiene. Posteriormente el guante pasa a la toma y envío de datos con los valores de los 5 sensores con una frecuencia de muestreo de 75 Hz.

Usando este guante, se han definido varios movimientos de la mano, con un significado específico, que puede realizar el cirujano durante una HALS, y se ha desarrollado un algoritmo para su detección. Los movimientos definidos anteriormente no se deben confundir con los movimientos realizados comúnmente durante la operación. Se enviarán a un sistema de reconocimiento y gestión global para generar los comandos pertinentes que se enviarán al robot colaborativo para su ejecución durante la cirugía.

En este artículo se comentarán los resultados referidos a un movimiento seleccionado como ejemplo.

2 DEFINICIÓN DE MOVIMIENTO A DETECTAR

Los movimientos seleccionados no corresponden a gestos estáticos de la mano sino a gestos dinámicos, e intencionados, que van a tener un significado en el sistema, en relación con los comandos que el cirujano desea enviar al robot colaborativo en el curso de la operación quirúrgica. Dado que tienen un significado concreto, han de definirse previamente según un perfil. Cuando el cirujano realiza el movimiento, éste se ejecutará en un intervalo como una secuencia de posiciones que toma la mano, siendo capturadas por los sensores del guante e identificados por un algoritmo que reconoce el movimiento por comparación con el patrón. La velocidad a la que se realizan los movimientos a identificar es mayor que el resto de los realizados durante la operación. En la figura 2 se muestran las posiciones inicial y final de un movimiento específico seleccionado como ejemplo en este artículo y que se puede interpretar como un comando de acercamiento de la herramienta laparoscópica.

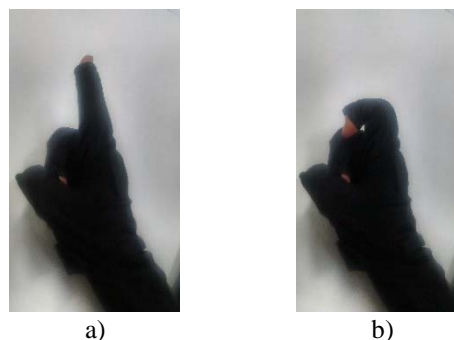


Figura 2: Posiciones inicial, a), y final, b), del movimiento seleccionado como ejemplo.

La posición a), con el dedo índice extendido, pasaría a la posición b), flexionando el dedo. Posteriormente se volvería a la posición a), extendiendo el dedo índice. Se considera que el movimiento se ha realizado cuando se detecte la secuencia a-b-a-b-a. El ciclo completo podría repetirse varias veces. El resto de los dedos de la mano permanecen quietos, por lo que su posición a lo largo del movimiento no cambia significativamente.

3 TOMA DE DATOS Y ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO

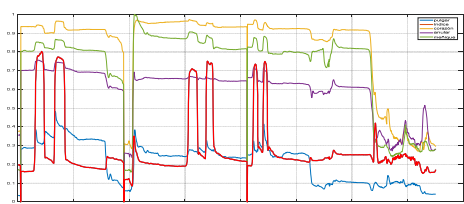


Figura 3: Captura de datos de los sensores del guante

La figura 3 muestra una captura típica de datos de los sensores del guante asociados a los dedos de la mano. El eje de abscisas representa el tiempo y el de ordenadas, entre 0 y 1, muestra la flexión del sensor correspondiente, con valores bajos, cercanos a 0 cuando está flexionado, y con valores altos, cercanos a 1, cuando está extendido. Pueden observarse, siguiendo la línea roja correspondiente a la señal del dedo índice, que el ciclo completo del movimiento definido previamente se ha repetido, aparentemente, tres veces.

En el análisis de los datos se ha de tener en cuenta cómo se realiza el movimiento, tanto en recorrido de flexión/expansión de los dedos involucrados como en velocidad, para que no se confunda con movimientos realizados de manera accidental.

El primer paso consiste en la caracterización del movimiento seleccionado para generar las ordenes que serán enviadas al robot colaborativo. En la Figura 4 se representa el movimiento seleccionado. Para su análisis y caracterización se ha de tener en cuenta: el valor de flexión proporcionado por el guante y proporcional a la flexión del sensor y por tanto del dedo correspondiente (Figura 4), la velocidad a la que se realiza (Figura 5), y el tiempo en el que se lleva a cabo. Por ello habrá que definir unos parámetros característicos que variarán según el tipo de movimiento y la persona que lo realiza, lo que hace necesario un aprendizaje previo, para cada persona y cada movimiento, que permita su parametrización.

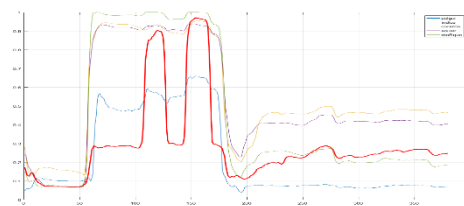


Figura 4: Gráfica con los valores proporcionados por el guante de datos durante la realización del movimiento seleccionado.

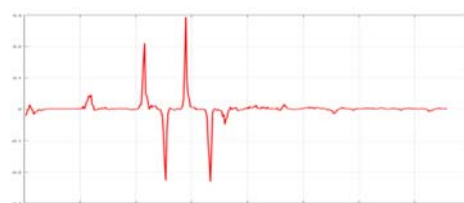


Figura 5: Gráfica de la velocidad del dedo índice durante la realización del movimiento.

Analizando la velocidad (Figura 5) podemos observar cuándo se realizan movimientos a una velocidad mayor que los movimientos realizados de forma involuntaria. Según sea negativa o positiva la velocidad, podemos saber si el dedo está realizando un movimiento de apertura o de cierre. Estas velocidades servirán como umbral para que el algoritmo desarrollado considere que se está realizando un moviendo.

Observando las gráficas obtenidas al realizar el movimiento seleccionado, podemos diferenciar movimientos de cierre y apertura, flexión/expansión de los dedos, coincidiendo respectivamente con los descensos y ascensos en la gráfica.

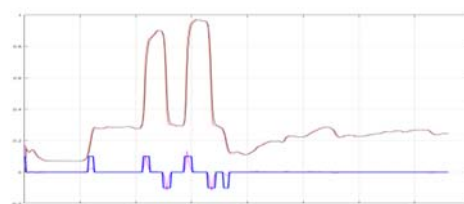


Figura 6: Gráfica con los valores proporcionados por el guante de datos durante la realización del movimiento seleccionado, correspondiente al dedo índice.

4 DEFINICIÓN DE PATRONES DE MOVIMIENTO

Para obtener el patrón de cada movimiento se ha tenido en cuenta los dedos involucrados, la velocidad de los movimientos y el carácter en sí del movimiento (flexión o extensión).

Hallando las características particulares de cada movimiento definido en el protocolo, podemos crear un patrón para su identificación.

Teniendo en cuenta la velocidad consideramos sólo si el dedo está en movimiento o no. Tenemos que considerar la velocidad a la que se realizan los movimientos para no confundir los movimientos definidos con otros realizados durante la operación.

El análisis de la velocidad es importante ya que no sólo analizamos la posición inicial y final del movimiento, sino que también buscamos analizar cómo se llega de la una a la otra. Con ello nos aseguramos de que el movimiento se realiza de manera precisa, conscientemente, y no es debido a diferentes posiciones que adoptará la mano del cirujano durante la intervención.

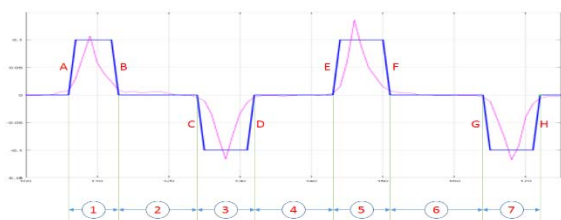


Figura 7. Caracterización del patrón de movimiento seleccionado

Para obtener los parámetros característicos del movimiento definido, se tiene en cuenta varias tomas del mismo movimiento realizado por la misma persona. La Figura 7 muestra el patrón del movimiento seleccionado. Se consideran 7 intervalos delimitados por flancos ascendentes o descendentes de la curva de velocidad (curva rosa) cuando sobrepasan un cierto valor de umbral. Para que el movimiento se considere realizado, se han de detectar los 7 intervalos, así como que los valores de la señal, correspondiente a flexión/expansión completa, alcancen unos valores que dependen de la persona que realiza el movimiento.

Para cada uno de los 7 intervalos se define un rango de valores, que también serán propios de cada persona. La forma de caracterizarlos consiste en realizar múltiples repeticiones del movimiento, tras un aprendizaje, y calcular la media y desviación típica de cada intervalo.

5 DETECCIÓN DE PATRONES

El algoritmo desarrollado analiza los valores de cada sensor buscando los patrones definidos de cada movimiento que se defina.

Comparando el valor actual del guante respecto del valor en el instante anterior podemos deducir si el

dedo en cuestión está flexionándose, estirándose o permanece en la misma posición. Con la comparación de dichos valores y teniendo en cuenta el tiempo, podemos obtener la velocidad con la que se está realizando el movimiento del dedo.

Se han definido umbrales para evitar que no se consideren como movimiento pequeñas oscilaciones.

Lo primero que hace el algoritmo es catalogar el movimiento de cada dedo como flexión, extensión o paro analizando el valor de cada sensor con el valor en el instante anterior. Para que se considere movimiento debe superar un umbral para evitar catalogar de forma errónea una oscilación del dedo como un movimiento.

Dos consideraciones: una para considerarse movimiento respecto con el valor anterior y otra estar el tiempo suficiente como para considerarlo el movimiento definido.

El algoritmo analiza los valores del sensor para detectar algún sub-movimiento perteneciente a los movimientos que se definan. Una vez que detecta un sub-movimiento, lo cataloga como posible parte de un movimiento y sigue analizando los valores para confirmar o no si se realizan todos los sub-movimientos que definen el posible movimiento a detectar.

Si no hay confirmación, sigue buscando sub-movimientos que puedan corresponder con el inicio de algún movimiento.

El algoritmo para la detección de movimientos analizará las velocidades a la que se están moviendo los dedos para detectar si puede considerarse parte de alguno de ellos.

6 PRUEBAS

Las pruebas realizadas están relacionadas con la definición y detección de movimientos, así como con la precisión de la detección de los mismos.

En la Figura 7 se muestra una captura de datos del guante para la prueba de detección del movimiento seleccionado. En el eje de ordenadas no se representa el valor real de los datos medidos por los sensores, que está entre 0 y 1, sino que se ha separado la representación de cada sensor, aunque a escala, para facilitar la interpretación. Se observa que, aunque el dedo índice es el que se mueve intencionadamente para reproducir el movimiento, el resto de los dedos siguen movimientos no intencionados. Se ha de tener en cuenta que el movimiento de los dedos no es completamente independiente, sino que el movimiento intencionado de unos, por ejemplo, el

índice, conlleva un movimiento no intencionado de otros, como se refleja en la figura 8:

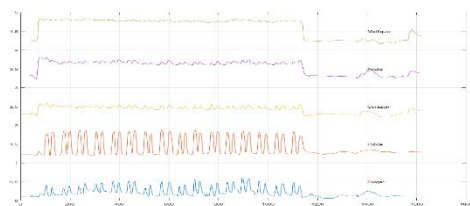


Figura 8: Captura de datos del guante en prueba de movimiento

Como se puede ver en la Figura 8, el movimiento seleccionado se ha reproducido, aparentemente, 16 veces. En la Figura 9 se representan los datos correspondientes al sensor del dedo índice, así como las líneas de velocidad y de seguimiento del patrón caracterizado en la figura 6. Se observa que, en realidad, el movimiento se ha detectado en 14 ocasiones, representado con asteriscos verdes en la curva del patrón, y en dos ocasiones ha fallado la detección, debido a que los datos no concuerdan con los parámetros que definen el patrón de movimiento. En concreto, alguna de las siguientes razones: que el nivel los datos correspondientes a la flexión del dedo índice alcance un valor inferior a 0.3 y en el caso de la expansión sobrepase el valor de 0.7, que se siga el perfil de movimiento, o que las duraciones temporales de cada intervalo, estén dentro de los rangos que se definan para la persona que realiza el movimiento, es decir, a partir de los valores medios y desviación típica de cada intervalo temporal tras múltiples repeticiones intencionadas del movimiento.

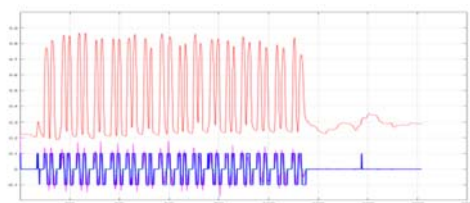


Figura 9: Datos correspondientes al dedo índice y seguimiento del patrón de movimiento

En los experimentos realizados con el guante, el algoritmo desarrollado permite detectar el movimiento definido entre varios movimientos realizados. Lógicamente, para ser identificados con el patrón, los movimientos ejecutados por el cirujano deben comenzar y terminar con posiciones similares a las de los patrones y no incluir movimientos intermedios extraños.

La identificación de estos movimientos no sólo se basa en las posiciones inicial y final a sí mismo, sino que las posiciones y velocidades se analizan en cada momento para determinar si conforman un patrón similar al del modelo. Esto permite analizar patrones

con más información y que se pueden identificar de una forma mucho más confiable evitando errores en aquellas situaciones donde las posiciones son similares pero la velocidad de ejecución de la maniobra es muy diferente.

7 CONCLUSIONES

En este artículo, se ha considerado el uso de un guante sensorizado que incorpora 5 sensores, uno por cada dedo, para su uso en cirugía laparoscópica asistida por la mano (HALS). El objetivo ha consistido en identificar el proceso que el cirujano está llevando a cabo en cada momento y, por tanto, poder enviar automáticamente los comandos pertinentes a un robot colaborativo. Las características de los movimientos de los dedos han sido estudiadas desde la posición inicial hasta la final en las operaciones / maniobras contempladas. Estos patrones se han unido al algoritmo de detección y ha permitido obtener un sistema que ha demostrado ser muy efectivo en la discriminación de este primer conjunto de movimientos considerados.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, a través del subproyecto: "Sensorized HALS. Entorno sensorizado para cirugía laparoscópica asistida por la mano", definido dentro del proyecto coordinado "Sistema robotizado colaborativo para cirugía laparoscópica asistida por la mano". DPI2013-47196-C3-3-R.

Referencias

- [1] Aalbers G. J., Doeksen a, Van Berge M. I. Henegouwen, Bemelman W., (2010) "Hand-assisted laparoscopic versus open approach in colorectal surgery: a systematic review", *Colorectal Dis.*, vol. 12, no. 4, pp. 287-295.
- [2] Bauzano, E., (2013) "A minimally invasive surgery robotic assistant for HALS-SILS techniques", *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 112:2, Nov. 2013, pp. 272-283.
- [3] Bauzano, E., Garcia-Morales, I., del Saz-Orozco, P., Fraile, J.C., Muñoz, V.F., (2014) "Robot collaborative assistance for suture procedures via minimally invasive surgery", *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 252, pp. 255-269.
- [4] Da Vinci Surgery: Minimally Invasive Surgery. <http://www.davincisurgery.com/> (28 abril 2017)

- [5] Ding J., Xia Y., Liao G., Zhang Z., Liu S., Zhang Y., Yan Z. (2014) "Hand-assisted laparoscopic surgery versus open surgery for colorectal disease: a systematic review and meta-analysis," *The American Journal of Surgery*, vol. 207, no. 1, pp. 109–119
- [6] Di Pietro, L., Sabatini, A.M., Dario, P. (2008) "A survey of glove-based systems and their applications", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, 38:4, pp 461–482.
- [7] Jayne D.G., Thorpe H.C., Copeland J., Quirke P., Brown J.M., Guillou P. J., (2010) "Five-year follow-up of the Medical Research Council CLASICC trial of laparoscopically assisted versus open surgery for colorectal cancer," *Br. J. Surg.*, vol. 97, no. 11, pp. 1638–1645.
- [8] LaViola, J.J. (1999), "A survey of hand posture and gesture recognition techniques and technology". Brown Univ. Providence. RI.
- [9] Leraas H. J., Ong C. T., Sun Z., Adam M. A., Kim J., Gilmore B. F., Ezekian B., Nag U. S., Mantyh C. R., Migaly J. (2017) "Hand-Assisted Laparoscopic Colectomy Improves Perioperative Outcomes Without Increasing Operative Time Compared to the Open Approach: a National Analysis of 8791 Patients", *J Gastrointest Surg.* 21:4, pp. 684–691
- [10] Nakajima K., Lee S. W., Cocilovo C., Foglia C., Sonoda T., Milsom J. W., (2004) "Laparoscopic total colectomy: Hand-assisted vs standard technique," *Surg. Endosc. Other Interv. Tech.*, vol. 18, no. 4, pp. 582–586.
- [11] Proyecto BROCA. <http://www.proyecto-broca.es> (28 abril 2017)
- [12] Sánchez-Margallo, F. M.; Pérez-Duarte, F. J.; Sánchez-Margallo, J. A.; Lucas-Hernández, M.; Matos-Azevedo, A. M.; Díaz-Güemes, I. (2014) "Application of a motion capture data glove for hand and wrist ergonomic analysis during laparoscopy". *Minim. Invasive Ther. Allied Technol.* 23, pp. 350–356.
- [13] Shiozaki A., et al. (2017) "Hand-assisted technique beneficial for laparoscopic transhiatal esophagectomy with en-bloc dissection of middle and lower mediastinal lymph nodes: roles of the operator's left hand", *Esophagus*, 14: 2, pp 138–145
- [14] Sturman, D. J.; Zeltzer, D. (1994) "A Survey of Glove-based Input", *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 14, pp. 30–39.
- [15] Swanson T. W., Meneghetti A. T., Sampath S., Connors J. M., and. Panton O. N. M, (2011) "Hand-assisted laparoscopic splenectomy versus open splenectomy for massive splenomegaly: 20-Year experience at a Canadian centre," *Can. J. Surg.*, vol. 54, no. 3, pp. 189–193.
- [16] Targarona, E.M., Gracia, E., Garriga, J., Martínez-Bru, C., Cortés, M., Boluda, R., Lerma, L., Trías, M., (2002) "Prospective randomized trial comparing conventional laparoscopic colectomy with hand-assisted laparoscopic colectomy: Applicability, immediate clinical outcome, inflammatory response, and cost", *Surgical Endoscopy and Other Interventional Techniques*, 16:2, pp. 234–239.
- [17] Taylor, R.H., Funda, J., Eldridge, B., Gomory, S., Gruben, K., LaRose, D., Talamini, M., Kavoussi, L., Anderson, J., (1995) "A telerobotic assistant for laparoscopic surgery", *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 14:3, pp. 279–288.

BIOSENSORES PARA CONTROL Y SEGUIMIENTO PATOLOGÍAS REUMATOIDES

Amparo Tirado, Raúl Marín, José V. Martí, Miguel Belmonte, Pedro J. Sanz
Departamento de Ingeniería y Ciencia de Computadores, Facultad de Ciencias de la Salud
Universitat Jaume I Castellón de la Plana (España)
{al028901,rmarin,vmarti,belmonte,sanzp}@uji.es

Resumen

El propósito de este artículo es describir el análisis efectuado para obtener un dispositivo que permita mejorar el seguimiento y control de los pacientes con enfermedades inflamatorias como artritis reumatoide (AR), artritis psoriásica (APs) y espondilitis anquilosante (EA). Actualmente este seguimiento se realiza a través de cuestionarios que los propios pacientes deben autocompletar previamente a las visitas con el especialista. Estos formularios aportan información insuficiente, ya que es totalmente subjetiva y depende del estado del paciente en el momento de realizar el cuestionario. Los médicos especialistas consideran que sería una gran ayuda disponer de algún mecanismo no invasivo, que pudiera ser incorporado por los pacientes y estuviera tomando muestras durante el periodo previo a la visita médica.

Para ello se ha realizado un estudio de los biosensores que se están desarrollando actualmente para ver cuál es el que puede proporcionar una información extra para poder realizar un seguimiento más exhaustivo de la evolución de los pacientes.

Queremos que sea un dispositivo de fácil utilización y uso, ya que está orientado a personas mayores, que comienzan a presentar problemas de movilidad.

Palabras clave: Biosensor, Rehabilitación, Reumatoide

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente los médicos especialistas en enfermedades inflamatorias proporcionan a los pacientes durante sus visitas semanales un cuestionario que éstos deben cumplimentar utilizando para ello sus recuerdos y sensaciones. Unos ejemplos de estos cuestionarios serían.

- MD-HAQ (Multidimensional Health Assessment Questionnaire) ¹.

¹MD-HAQ - http://www.ser.es/wp-content/uploads/2016/07/MD-HAQ_cuestionario.pdf

- EQ-5D (European Quality Of Life) ².
- SF36 (36-item Short-Form Health Survey) ³.

Los cuestionarios se presentan al paciente el día de la consulta o se le entregan para que sean completados el día previo a la consulta con el especialista.

Aquí podemos ver un ejemplo de un cuestionario entregado al paciente.

Versión Española del BASDAI ¹

Por favor, marque el número que mejor describa su situación en la **ÚLTIMA SEMANA**:

1) ¿Cuánta fatiga o cansancio ha tenido usted?

Ninguno ☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐ 10 ☐ Muchísimo

2) ¿Cuánto dolor ha tenido usted en cuello, espalda o caderas debido a la espondilitis anquilosante?

Ninguno ☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐ 10 ☐ Muchísimo

3) ¿Cuánto dolor o inflamación ha tenido usted en las otras articulaciones (sin contar cuello, espalda y caderas)?

Ninguno ☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐ 10 ☐ Muchísimo

4) ¿Cuánto malestar ha tenido usted en las partes de su cuerpo que le duelen al tocarlas o presionarlas?

Ninguno ☐ 0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5 ☐ 6 ☐ 7 ☐ 8 ☐ 9 ☐ 10 ☐ Muchísimo

Figura 1: R. Ariza-Ariza, B. Hernández-Cruz y F. Navarro-Sarabia. Rev Esp Reumatol 2004;31(6):372-8 *Diseño: E. Batlle - HGU-Alicante

Queremos encontrar un dispositivo lo más completo posible que permita un uso continuado por parte del paciente y ayude al especialista a realizar un seguimiento de la evolución del mismo, para poder ajustar y validar los tratamientos.

En el siguiente artículo podemos ver un estudio similar denominado CAALYX (Complete Ambient Assisted Living eXperiment) [10], dirigido a personas mayores, para su uso en el hogar, que puede medir signos vitales como ECG, pulso,

²EQ-5D - <http://www.ser.es/wp-content/uploads/2016/07/EQ-5D-pdf.docx>

³SF36 - <https://campaign.optum.com/optum-outcomes.html>

presión arterial, detección de movimiento y caída. Es un proyecto de tele-monitorización sobre su localización por medio de brazaletes.

En la Figura 2 se muestra un diagrama del sistema CAALYX

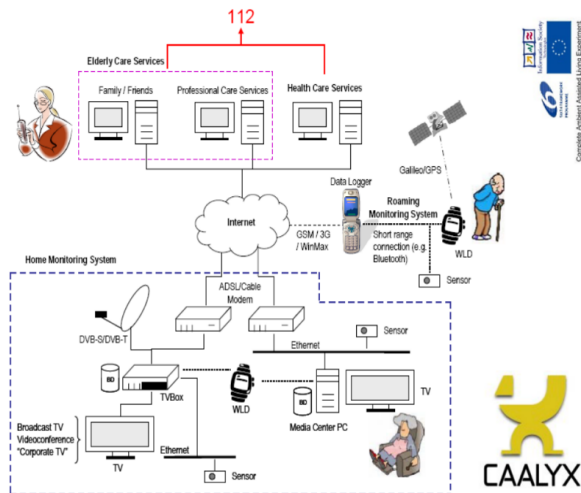


Figura 2: CAALYX system. Diagrama de componentes.

2 ESTADO DEL ARTE / BIOSENSORES

2.1 TIPOS DE SENSORES

Actualmente existe una gran diversidad de sensores que se están implementando y adaptando para poder ser utilizados como "wearables", estos sensores tienen multitud de aplicaciones como deportivas, moda, seguridad, industria y aplicaciones médicas.

Nuestro estudio se basa en biosensores desarrollados para aplicaciones médicas y en concreto los biosensores más adecuados para el seguimiento de las enfermedades inflamatorias reumatóides.

Podemos encontrar sensores ubicados sobre la piel, que ya es un nivel donde se puede analizar temperatura, pulso y ritmo respiratorio. Al respecto tenemos el estudio de "Chen, Y., Lu, B., Chen, Y., & Feng, X. (2015). Breathable and Stretchable Temperature Sensors Inspired by Skin. Scientific Reports, 5, 11505. <https://doi.org/10.1038/srep11505>" [1].

Tenemos que priorizar los sensores que cumplan con diversas características, por ejemplo que tengan una autonomía mínima de 48h, deben ser cómodos para el paciente, de poco peso y con la batería integrada. Sería conveniente que pudieran conectarse con dispositivos móviles, de forma que

permitan almacenar los datos y enviarlos a su vez a una base de datos que pueda ser consultada por medio de una aplicación parametrizable a medida. Para ello deben ser capaces de incorporar varias tecnologías para la comunicación, algunas de carácter obligatorio, como las conexiones USB y Bluetooth, y otras adicionales, como WiFi o NFC.

Podemos encontrar biosensores que dan soporte a diferentes características, clasificados según tabla adjunta 1 :

Tabla 1: Características biológicas

Características biológicas		
Temperatura corporal	Saturación de oxígeno en sangre	Pulso
Presión sanguínea	Ritmo respiratorio	Sudor
EMG Electromiograma	ECG Electrocardiograma	EEG Electroencefalografía
Características físicas		
GPS	IPS	Flexibilidad

2.1.1 Características biológicas

De todas las posibles características a evaluar para el muestreo de sensores nos quedamos con las que mejor se adaptan a los pacientes en estudio; éstas serían :

- **Pulso:** La función principal del corazón humano es bombear sangre y nutrientes oxigenados al cuerpo y eliminar el dióxido de carbono y otros desechos. La secuencia de ciclos de sangre desoxigenada a través de los pulmones y bombeo de sangre nuevamente oxigenada al cuerpo a través de la aorta se llama secuencia sístole-diástole. La frecuencia cardíaca (HR) o pulso es la frecuencia de la secuencia sístole-diástole, expresada como latidos por minuto (b.p.m.). El HR cambia según la necesidad del cuerpo y es susceptible a la alteración en el estado normal del cuerpo.

El ritmo cardíaco nos ayudará a validar el esfuerzo del paciente y su estudio comparativo nos indica la evolución física del paciente. Como podemos observar en [3], controlar la actividad cardíaca es de gran utilidad. En la Figura 3 podemos ver el esquema utilizado.



Figura 3: The scheme of the textronics system for protecting of elders. M. Frydrysiak and L. Tesiorowski, "Wearable textronic system for protecting elderly people," 2016 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA), Benevento, 2016, pp. 1-6.

Existe un trabajo [12] para la monitorización y diagnóstico de diferentes señales como el pulso, la saturación de oxígeno en sangre, que también hace hincapié en la importancia tanto de la medición de datos así como en su posterior interpretación, como se muestra en la Figura 4.

Este dispositivo también cumple una de las premisas de este estudio, que sea "wearable".

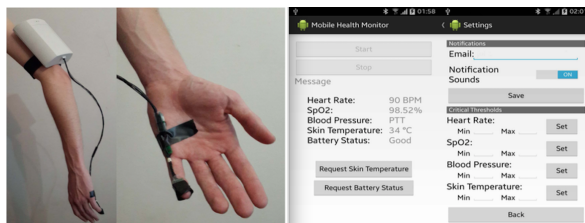


Figura 4: "Body Sensor Network for Mobile Health Monitoring, a Diagnosis and Anticipating System Johan Wannenburg; Reza Malekian IEEE Sensors Journal Year: 2015, Volume: 15, Issue: 12 Pages: 6839 - 6852, DOI: 10.1109/JSEN.2015.2464773 Cited by: Papers (8) IEEE Journals & Magazines"

- **Ritmo respiratorio:** El ritmo respiratorio nos ayuda a controlar la fatiga de los pacientes durante su jornada diaria, los que nos indicaría su evolución. En el estudio [7] se muestran los avances en las tecnologías inalámbricas y los diseños de dispositivos más flexibles con una interface mejorada al contacto con la piel.

Los sensores pueden medir de varias maneras al flujo de la respiración, con la expansión y contracción del pecho y el abdomen durante la respiración. Existen numerosos métodos

para traducir la expansión y contracción de los pulmones en una señal eléctrica. En la *pletismografía de impedancia*, los electrodos se colocan sobre el cuerpo y el cambio en la impedancia entre ellos refleja el cambio en el volumen pulmonar durante la inhalación y la espiración. Sin embargo, la mayoría de los sensores de respiración portátiles se expanden físicamente y se contraen junto con los pulmones y emplean algún tipo de deformación o detección de presión para detectar el cambio de volumen. Para este tipo de sensores se utilizan principalmente textiles como podemos ver en la Figura 5.

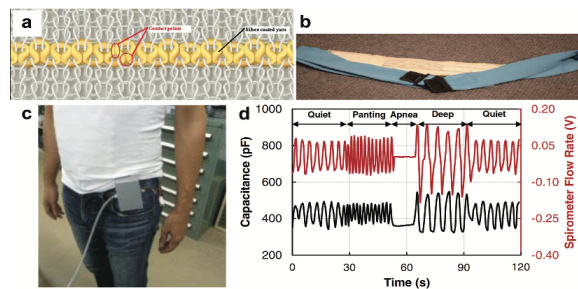


Figura 5: "Monitoring of Vital Signs with Flexible and Wearable Medical Devices Yasser Khan, Aminy E. Ostfeld, Claire M. Lochner, Adrien Pierre, and Ana C. Arias"

- **EMG Electromiograma:** Este sensor de músculo mide la actividad muscular por medio del potencial eléctrico generado por las células de la fibra muscular. El sensor amplifica y procesa las complejas señales eléctricas y las convierte en una simple señal analógica que puede ser leída fácilmente por un microcontrolador. En el estudio [6] se indica claramente la utilidad de esta medición. Por este motivo lo consideramos un sensor imprescindible en el estudio y análisis de las enfermedades inflamatorias. Este tipo de sensores han tenido un gran avance en estudios relacionados con exoesqueletos, véase [2], su uso mejora el funcionamiento de los exoesqueletos. La Figura: 6 muestra un esquema de su funcionamiento.

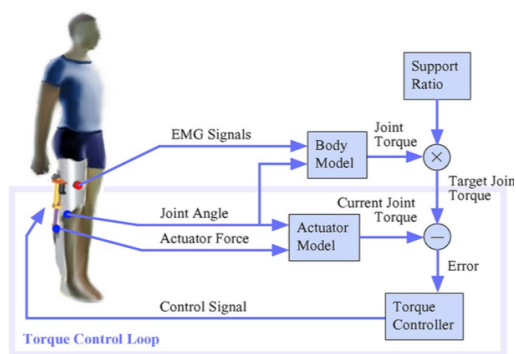


Figura 6: "A Human-Exoskeleton Interface Utilizing Electromyography Christian Fleischer and Günter Hommel"

2.1.2 Características físicas

- **GPS:** Para poder realizar un seguimiento completo del paciente, debemos controlar su movilidad, para poder evaluar sus funciones físicas y así poder comparar los datos a lo largo del tratamiento. Para ello nada mejor que un sensor de movimiento, como por ejemplo unidades de medición inercial (IMU) y el uso de la acelerometría para calcular el gasto energético [5]. Este tipo de sensores tienen gran presencia comercial, por ejemplo <https://www.invensense.com/products/motion-tracking/9-axis/>
- **IPS:** Un sistema de posicionamiento interior nos puede ayudar a controlar la movilidad del paciente dentro de su vivienda o en centros hospitalarios tal y como se indica en [3]. Con un sistema de balizas se pueden emplear técnicas de localización como la mostrada en [3].
- **Protocolo de comunicación:** La elección del protocolo de comunicación es un paso importante. Lo basaremos en el coste, la facilidad de configuración y de incorporar nuevos sensores. En el estudio [9] vemos una tabla comparativa.
- **Flexibilidad:** Es importante tener en cuenta la ergonomía del dispositivo, para poder evitar entre otras características diseños demasiado voluminosos o rígidos. Así mismo, es interesante intentar dotarlos de baterías de larga duración o que permitan la generación de energía. En la Figura 7 se muestra una imagen del prototipo propuesto por [11].

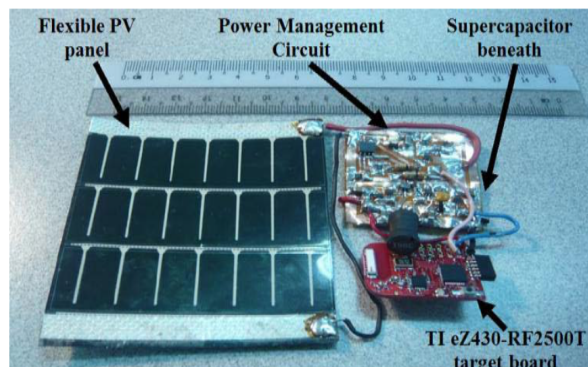


Figura 7: "Final integrated FEH system prototype. Autonomous Wearable Sensor Nodes with Flexible Energy Harvesting."

Existen numerosos estudios que tratan la durabilidad de las baterías e incluso dispositivos "SoC" capaces de obtener su propia energía [13]. El chip realiza la extracción de la frecuencia cardíaca del ECG y la detección de la fibrilación auricular mientras que solo consume 19 μ W, funcionando solamente en la energía obtenida. En la Figura 8 se muestra el diseño del chip.

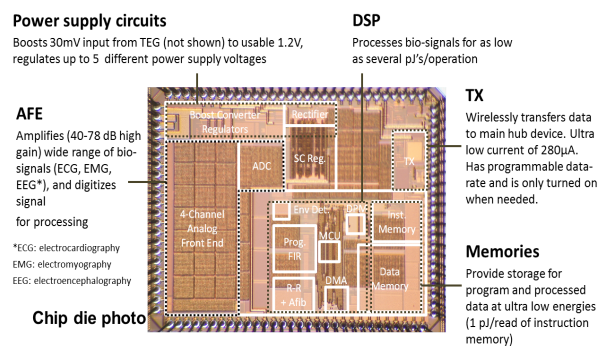


Figura 8: "A Batteryless 19 W MICS/ISM-Band Energy Harvesting Body Sensor Node SoC for ExG Applications"

3 PRODUCTOS COMERCIALES

3.1 Simband modular health band

Plataforma de código abierto, <https://www.simband.io/documentation/simband-documentation/>, mostrado en las Figuras 9, 10, 11 y 12

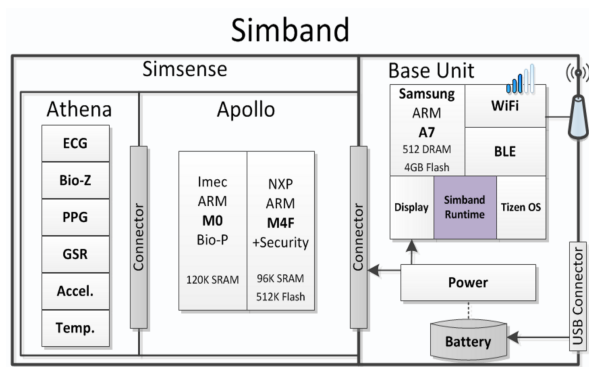


Figura 9: "Simband- Diagrama"

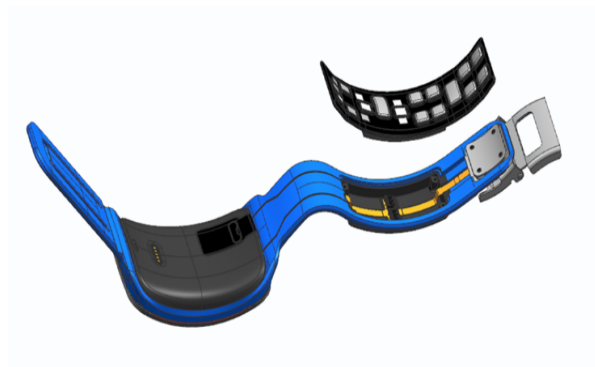


Figura 12: "Simband - Sensores"

3.2 Empatica E4 Wristband

Este brazalete [4], mostrado en la Figura 10, recoge continuamente el ritmo cardíaco, la actividad electrodérmica, la temperatura y la actividad física mediante tres acelerómetros. Con las aplicaciones desarrolladas para este sensor, se puede monitorizar la salud del paciente mientras está en su casa, o mediante una aplicación móvil por los familiares.



Samsung - Simband

Figura 10: "Simband"

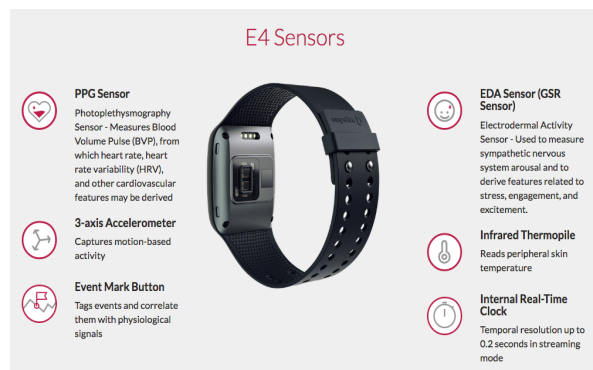


Figura 13: "Empatica E4 Wristband"

Las características completas las podemos encontrar en la web corporativa <https://www.empatica.com/e4-wristband>

3.3 e-Z430-Chronos

Dispositivo de Texas Instruments http://www.ti.com/solution/wireless_patient_monitor, consistente en un reloj de aspecto normal, mostrado en la Figura 14, dotado de acelerómetro y sensor de temperatura corporal, al que pueden ser adaptados sensores inalámbricos permitiendo obtener ECG, niveles de oxígeno y otros parámetros del paciente.

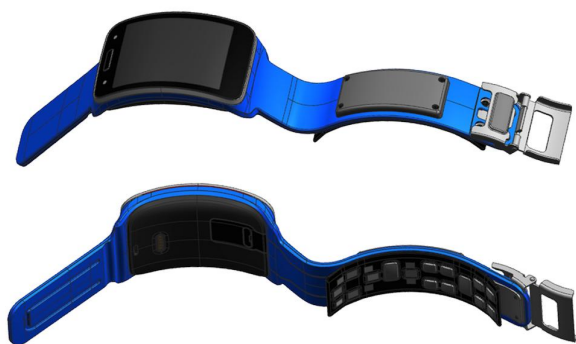


Figura 11: "Simband - Diseño"



Figura 14: "eZ430-Chronos

4 COMPARATIVA

Todos los productos comerciales que hemos estudiado poseen de un API que nos permite crear nuestras propias aplicaciones para el tratamiento de los datos obtenidos. En la Tabla 2, podemos ver que son pocos los productos actualmente comercializados que incorporen varios sensores en un mismo dispositivo.

Tabla 2: Comparativa Productos Comerciales

Productos	Características					
	GSR	ECG	Acc	Temp	Pulso	Coste
Simband	x	x	x	x		-
Empatica	x		x	x	x	1.521\$
Chronos		x				58\$

5 CONCLUSION

Necesitamos un sensor que tenga buena aceptación por parte de los pacientes [8], que suponga para ellos un aliciente y no les cause rechazo. Debe ser capaz de monitorizar su actividad diaria, almacenarla y proveer de un mecanismo sencillo y configurable para la obtención de los resultados.

Hemos de tener en cuenta los parámetros que es capaz de medir, la conectividad del sistema, la durabilidad de su batería, la interfaz de la que dispone, así como los materiales, para que pueda ser flexible y duradero.

Actualmente no existen en el mercado dispositivos que se adapten completamente a nuestros objetivos. Hemos podido observar que se están realizando numerosos avances técnicos en cuanto a la mejora de los sensores, su flexibilidad, que los hacen mas cómodos y su durabilidad, con baterías que se autorrecargan.

Si pensamos en productos que existan actualmente en el mercado son pocos los que se dedican al área de salud, ya que la gran mayoría avanza hacia área deportivas. Los que se están desarrollando son dispositivos que se integran en un sistema para motorizar pacientes en entorno clínicos, son complejos de manejar y no pueden ser utilizados por el propio paciente en el hogar, un ejemplo sería el Drager Infinity M540 ⁴.

Muy pocos están dirigidos hacia personas mayores, teniendo en cuenta el envejecimiento de la población mundial y el aumento de las esperanza de vida, pensamos que hemos de hacer lo posible por mejorar el seguimiento y control de este sector de la población para ayudar a la detección precoz de dolencias propias de la edad, así como poder validar mejor el funcionamiento de los distintos tratamientos prescritos a los pacientes.

Agradecimientos

El presente trabajo está soportado por la Universidad Jaume I, en colaboración con la Sección de Reumatología del Hospital General de Castellón, a través del Departamento de Ingeniería y Ciencia de los Computadores, grupo de investigación en robótica IRSLab (www.irs.uji.es). Por el gran interés del uso de biosensores para monitorizar el estado del usuario en el momento de intervenciones robóticas de rescate, el presente trabajo está parcialmente soportado por los siguientes proyectos, MINECO DPI2014-57746-C3-1-R (MERMANIP Project), Generalitat Valenciana GVA-PROMETEO/2016/066, y Universidad Jaume I de Castellón (P1-1B2015-68)

Referencias

- [1] CHEN, Y., LU, B., CHEN, Y., AND FENG, X. Breathable and Stretchable Temperature Sensors Inspired by Skin. *Scientific Reports* 5, 1 (sep 2015), 11505.
- [2] FLEISCHER, C., AND HOMMEL, G. A human-exoskeleton interface utilizing electromyography. *IEEE Transactions on Robotics* 24, 4 (Aug 2008), 872–882.
- [3] FRYDRYSIAK, M., AND TESIOROWSKI, L. Wearable textronic system for protecting elderly people. In *2016 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA)* (May 2016), pp. 1–6.
- [4] GARBARINO, M., LAI, M., BENDER, D., PICARD, R., AND TOGNETTI, S. Empatica E3

⁴Drager - https://www.draeger.com/en-us_us/Hospital/Products/Patient-Monitoring/Patient-Monitors/Infinity-M540-monitor

- A wearable wireless multi-sensor device for real-time computerized biofeedback and data acquisition. 39–42.
- [5] GRIMM, B., AND BOLINK, S. Evaluating physical function and activity in the elderly patient using wearable motion sensors. *EFORT Open Reviews* 1, 5 (2016), 112–120.
- [6] GUTIERREZ-GUTIEREZ, G., BARBOSA LOPEZ, C., NAVACERRADA, F., AND MIRALLES MARTINEZ, A. Utilidad del electromiograma en el diagnostico de las miopatias inflamatorias. *Reumatologia Clinica* 8, 4 (2012), 195–200.
- [7] KHAN, Y., OSTFELD, A. E., LOCHNER, C. M., PIERRE, A., AND ARIAS, A. C. Monitoring of vital signs with flexible and wearable medical devices. *Advanced Materials* 28, 22 (2016), 4373–4395.
- [8] MERCER, K., GIANGREGORIO, L., SCHNEIDER, E., CHILANA, P., LI, M., AND GRINDROD, K. Acceptance of Commercially Available Wearable Activity Trackers Among Adults Aged Over 50 and With Chronic Illness: A Mixed-Methods Evaluation. *JMIR mHealth and uHealth* 4, 1 (jan 2016), e7.
- [9] MUKHOPADHYAY, S. C. Wearable sensors for human activity monitoring: A review, 2015.
- [10] ROCHA, A., MARTINS, A., FREIRE, J. C., KAMEL BOULOS, M. N., VICENTE, M. E., FELD, R., VAN DE VEN, P., NELSON, J., BOURKE, A., ??LAIGHIN, G., SDOGATI, C., JOBES, A., NARVAIZA, L., AND RODR??GUEZ-MOLINERO, A. Innovations in health care services: The CAALYX system. *International Journal of Medical Informatics* 82, 11 (2013).
- [11] TOH, W. Y., TAN, Y. K., KOH, W. S., AND SIEK, L. Autonomous wearable sensor nodes with flexible energy harvesting. *IEEE Sensors Journal* 14, 7 (2014), 2299–2306.
- [12] WANNENBURG, J., AND MALEKIAN, R. Body sensor network for mobile health monitoring, a diagnosis and anticipating system. *IEEE Sensors Journal* 15, 12 (Dec 2015), 6839–6852.
- [13] ZHANG, Y., ZHANG, F., SHAKHSHEER, Y., SILVER, J. D., KLINEFELTER, A., NAGARAJU, M., BOLEY, J., PANDEY, J., SHRIVASTAVA, A., CARLSON, E. J., WOOD, A., CALHOUN, B. H., AND OTIS, B. P. A batteryless 19 uw mics/ism-band energy harvesting body sensor node soc for exg applications. *Journal of Solid State Circuits* 48 (01/2013 2013), 199–213.

ASSESSMENT OF TREMOR SEVERITY IN PATIENTS WITH ESSENTIAL TREMOR USING SMARTWATCHES

M.A. Velasco¹, R. López-Blanco², J.P. Romero³, M.D. del Castillo¹, J.I. Serrano¹, J. Benito-León², E. Rocon¹

¹Neural and Cognitive Engineering group, Centro de Automática y Robótica (CAR) CSIC-UPM, Ctra. Campo Real, km 0.2, 28500, Arganda del Rey, e.rocon@csic.es; ²Instituto de Investigación (i+12), Hospital Universitario 12 de Octubre, Av. de Córdoba s/n, 28041, Madrid, jbenitol67@gmail.com; ³Unidad de Daño Cerebral, Hospital Beata María Ana, Madrid, C. del Dr. Esquerdo, 83, 28007, Madrid, p.romero.prof@ufv.es

Abstract

This paper presents a classification model for the automatic quantification of tremor severity in patients with essential tremor (ET). The system is based on the signals measured by two commercial smartwatches that the patients wear on their wrist and ankle. The smartwatches register acceleration and angular velocity in these body segments. A set of nine tremor features were used to train the classification algorithm. The proposed algorithm is based on a C4.5 decision tree classifier. It is able to assess rest and kinetic (postural or action) tremor. The method was evaluated using data collected from thirty-four patients with ET. The algorithm classifies the severity of tremor in five levels 0-4 corresponding to those in the Fahn-Tolosa-Marin tremor rating scale with a 94% accuracy. The method can be implemented in a networked platform for the remote monitoring and assessment of movement disorders such as ET or Parkinson's disease.

Keywords: tremor assessment; time series classification; Essential Tremor.

1 INTRODUCTION

Essential tremor (ET) is considered the most prevalent type of tremor in adults, affecting ~ 5% of people over age 65 [1]. Bilateral postural with or without kinetic (in posture or action) tremor are the hallmarks of this entity, but mild rest tremor can be observed in some long-standing severe kinetic tremor [2]. Remarkably, 75% of the patients with ET report significant disability [3], consisting in relevant interference with employment, activities of daily living (ADL), and social function [4]. Improving tremor management in these patients could therefore drastically reduce direct and indirect costs related to the disease. It could also improve the quality of life and independence of both patients and caregivers.

Many objective transducer-based measures, such as electromyography (EMG), vocal acoustic analysis, accelerometers, or gyroscopes, have been used for the quantification and characterization of tremor [5]. They proved to be more sensitive than clinical rating scores to changes in tremor amplitude and frequency in specific scenarios [6]. The miniaturization of inertial measurement units (IMU) makes wearable technology closer to be ready for the clinical practice and long-term ambulatory tremor monitoring [7], [8]. However, new machine learning algorithms are needed to translate the high-dimensional data provided by wearables into clinically meaningful information [9].

Kubota et al. reviewed [9] unsupervised (clustering) and supervised machine learning algorithms such as linear regression, neural networks classifiers, support vector machines, k-nearest neighbors, naïve Bayes, or decision trees for measuring tremor symptoms in Parkinson's disease [9]. Whereas these methods can achieve very high values of accuracy, an incorrect training of the classifier can lead to errors in the prediction of new tremor episodes due to the overfitting of the trained model. Furthermore, these algorithms are trained with the assumption that the distribution of the training data is static and unchanging. Hence, the algorithms must be re-trained periodically in order to prevent invalid predictions. On the other hand, many of the reviewed algorithms focus on the detection of tremor and rely on further analysis for the quantification of severity [10].

In this paper, we propose an automated method for the classification of tremor severity in patients with ET. The methodology is based on the analysis of the signals registered by accelerometers and gyroscopes during standard clinical tasks to assess rest, postural and action tremor. A simple set of 9 features and a C4.5 decision tree classifier can be used to build a model that can be used later for the online classification of tremor in ambulatory monitoring applications. The automatic detection and

characterization of tremor are two of the main goals of the NetMD Project¹.

2 METHODOLOGY

2.1 PARTICIPANTS

Thirty-four patients (ages 18-81) with ET were recruited by the Neurology Department of the University Hospital “12 de Octubre” in Madrid. Eighteen of them were taking medication for their disease during the tests. Table 1 depicts the main clinical features of the participants in the study.

Table 1: Demographic and clinical data of patients with essential tremor (N = 34).

Age	
Mean \pm SD	64 \pm 14.4
Gender	
Female	14 (41.1%)
Male	20 (59.9%)
Disease duration (years)	
Mean \pm SD	12.5 \pm 10.4
Global FTM-TRS score at recruitment	
FTM-TRS-A	9.1 \pm 4.9
FTM-TRS-B	13.5 \pm 6.4
FTM-TRS-C	5.3 \pm 2.6

2.2 APPARATUS

An expert neurologist in movement disorders examined the patients. He used the Fahn-Tolosa-Marin (FTM) tremor rating scale (TRS) to assign a score to several items measured during a clinical examination: rest tremor, postural tremor, and action tremor. All the patients followed a specific protocol, which includes the following tasks:

- Measurement of rest tremor. Sitting on a chair with their hands resting in their lap. Count from 100 to 0.
- Measurement of kinetic (postural) tremor. Holding the arms outstretched with the hands in pronation.
- Measurement of kinetic (action) tremor. Finger to nose movements starting and ending with the arms outstretched to the sides.
- Measurement of kinetic (action) tremor. Pouring water between two glasses starting and ending with the arms resting.

These items are enumerated in Table 2 and correspond to the FTM-TRS part A and B [11]. The whole session was videotaped. The neurologist assigned a score to each task and patient after a thorough examination of the video.

Table 2: Fahn-Tolosa-Marin (FTM) tremor rating scale (TRS) score pattern for the tasks A-D.

FTM-TRS-A: Items 5 or 6	
Tasks A,B,C: rest and kinetic tremor	0: None
	1: Slight. May be intermittent.
	2: Moderate. Intermittent (< 2 cm).
	3: Marked amplitude (2-4 cm).
	4: Severe amplitude (> 4 cm).
FTM-TRS-B: Item 14	
Task D: Pouring water from a glass	0: Normal
	1: Slow, but no water is spilled.
	2: Spills 10% of water.
	3: Spills ~50% of water.
	4: Unable to complete the task.

During the experiments, the patients wore two Sony Smartwatch3 located on the wrist (SW_{3w}) and ankle (SW_{3a}) of the most affected hemibody. They also carried an Android Smartphone ASUS inside of a belt-pouch on the waist. An ad-hoc Android application acquired raw data obtained from the gyroscopes and the accelerometers at a sampling frequency of 50Hz. The Smartphone stored a timestamp and angular velocity and linear acceleration in three axis in a text file (txt). See Figure 1.



Figure 1: System of reference of the SW3.

The experiments were approved by the ethical standards committees on human experimentation at the University Hospital “12 de Octubre” (Madrid). The participants read and signed informed consent prior to the tests.

¹ http://g-nec.com/project_NetMD.html

2.3 CLASSIFICATION ALGORITHM

2.3.1 Signal preprocessing

The txt files were processed on a 2.83 GHz Inter Core 2 Quad Q9500 machine running Windows 7 Professional 32-bit. The preprocessing of the signal was done off-line using Matlab software (version 7.11.0 (R2010b); MathWorks, Natick, MA). A total of 136 segments (4 tasks x 34 patients) were annotated by the neurologists in terms of clinical task (A-D) and severity (0-4). The durations (mean \pm SD) of the segments corresponding to the tasks A-D are:

- Task A (rest tremor): 20.1 ± 11.4 s
- Task B (kinetic tremor): 23.3 ± 20 s
- Task C (kinetic tremor): 12.8 ± 3.5 s
- Task D (kinetic tremor): 54.8 ± 18 s

Figures 2-4 illustrate three examples of the gyroscope signal measured during the tasks which assessed kinetic tremor.

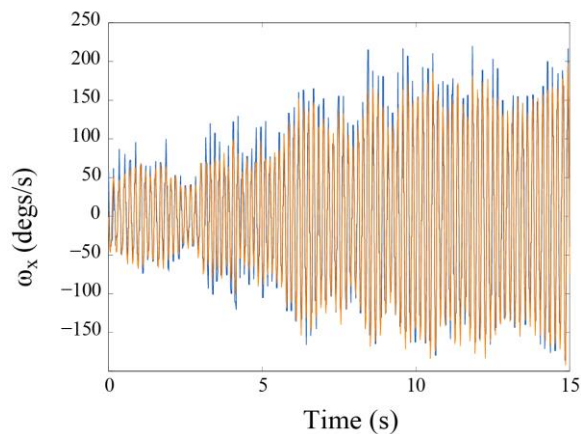


Figure 2: Gyroscope signal measured in the x-axis of the SW3_w. The blue curve represents the velocity of the wrist pronosupination in task B; the orange, the band-pass filtered signal.

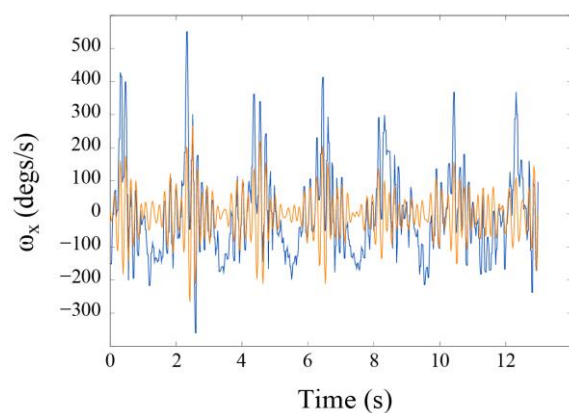


Figure 3: Seven repetitions of the finger-to-nose task (Task C). Raw and filtered wrist pronosupination.

More precisely, Figure 2 shows postural tremor, Figure 3 depicts action tremor in the finger-to-nose task, and Figure 4 exemplifies action tremor in the pouring task.

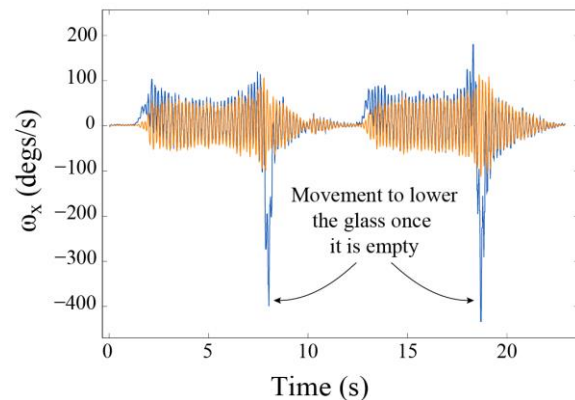


Figure 4: Two repetitions of the pouring task (Task D). Raw (blue) and filtered (orange) wrist pronosupination

The segmented signals were band-pass filtered using a 10th order Butterworth high-pass filter ($\text{freq}_1 > 3$ Hz) which removed the voluntary component, followed by a 10th order Butterworth low-pass filter ($\text{freq}_2 < 12$ Hz) which eliminated tremors of higher frequency.

2.3.2 Feature extraction

Nine tremor features were estimated from the recordings of the smartwatches as determined in [10]. They are enumerated in Table 3. The data registered by the SW3_w in the wrist was used to estimate the features f1-f6, f8, and f9. Note that feature f4 was estimated from the 3 Hz low-passed gyroscope signal. On the other hand, the feature f7, “other body segment energy” was calculated from the data registered by SW3_a, located in the ankle. The extraction of the features is based on a 3 s moving window with 0.1 s overlapping.

Table 3: Features for tremor recognition

Feature	Id	Sensor
Dominant Frequency	f1	Gyro
Energy on Dominant Frequency	f2	Gyro
High Frequency Energy	f3	Gyro
Low Frequency Energy	f4	Gyro
Spectrum Entropy	f5	Gyro
Mechanical Energy	f6	Acce
Other Body Segment Energy	f7	Gyro
Ratio Hi/Lo Frequency	f8	Gyro
f1*f2	f9	Gyro

Gyro = gyroscopes; Acce = accelerometers

2.3.2 Tremor classification

We used the Weka [12] collection of machine learning algorithms for the training of a C4.5 decision tree classifier and the evaluation of our set of tremor features.

The method proposed for the selection of the features was the wrapper approach. This method takes into account the classifier chosen. It also uses the best-first search algorithm. The wrapper approach used two classifiers: the C4.5 decision tree classifier and the naïve Bayes classifier consecutively. Additionally, a 10-fold cross-validation procedure was employed to achieve a more robust evaluation.

We also computed a 10-fold cross-validation during the training of the classifiers in order to avoid overfitting [13].

3 RESULTS

A total of 32745 sets of features were analyzed. The patients recruited showed mostly episodes of mild to moderate tremor. The FTM-TRS scores in the instances analyzed is depicted in Figure 5.

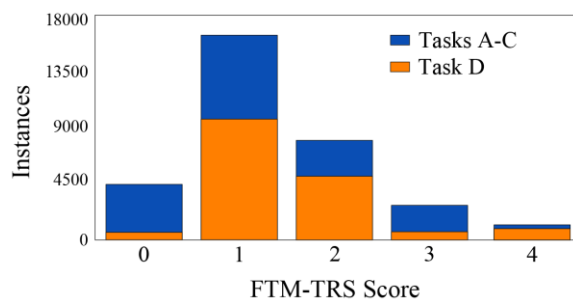


Figure 5: Distribution of instances corresponding to each FTM-TRS level assigned by the neurologist.

3.1 SELECTION OF FEATURES

With the C4.5 decision tree, the most selected features were the dominant frequency (f1), the energy at the dominant frequency (f2), the energy at low frequencies (f4), the spectrum entropy (f5), the mechanical energy (f6), the energy measured in SW3_a (f7), and the ratio of high/low energy (f8). The least selected features were the energy at high frequencies (f3) and f9. On the other hand, the naïve Bayes classifier selected f1, f5, and f8.

3.2 CLASSIFICATION MODELS

Two tremor severity classifiers were built: TC1 and TC2. TC1 was trained with the 9 features. The features f3 and f9, which were discarded by the

wrapper approach, are not included in the training and evaluation of the tremor classifier TC2.

The decision tree TC1 was built in 4.9 s. It had 1050 leaves and showed a classification error of 5.85 %. The range of error with a confident interval (CI) of 95 % was 5.55-6.09 %. The areas under ROC for the classes 0 to 4 were 0.969, 0.965, 0.968, 0.976, and 0.974, respectively.

TC2 had 1040 leaves and was able to only classify incorrectly 1804 instances (5.51%), CI at 95 %, 5.25-5.77 %. The time taken to build it with Weka was 3.33 s. In this case, the areas under ROC for the classes 0 to 4 were 0.971, 0.966, 0.969, 0.977, and 0.973. Table 4 depicts the confusion matrix estimated for TC2.

Table 4: Confusion matrix of the C4.5 decision tree classifier TC2 for tremor in ET.

TC2	Classified as				
Class	0	1	2	3	4
0	4153	303	17	2	1
1	232	15701	348	69	23
2	22	406	7414	79	51
3	1	53	92	2623	9
4	0	17	58	21	1050

We could not achieve a significant improvement of the classification errors after not including f3 and f9 in TC2. However, we improved the time needed to build the model by 32 %.

4 DISCUSSION

In this paper we proposed an algorithm for the automatic assessment of tremor severity in patients with ET. The algorithm is based on the analysis of the signals recorded by the accelerometers and gyroscopes which are integrated in two smartwatches that the patients wear in their wrist and ankle. These signals were preprocessed and characterized by a set of nine features. These extracted features were then used to train two C4.5 decision tree classifiers, TC1 and TC2. The system was validated with thirty-four patients with ET recruited at the University Hospital “12 de Octubre”.

The results show that the classifiers are able to identify the tremor severity among 5 levels of FMT-TRS score. Even though the accuracy of TC1 and TC2 is very similar, we were able to reduce the time needed to build the model in Weka by 32%.

The simplicity of the model makes it very easy to implement in different platforms. Additionally, the smartwatches used for the measurement of tremor

showed good wearability and an affordable price. These characteristics make the proposed platform a very interesting solution for the continuous and objective ambulatory monitoring of tremor and other movement disorders.

4.1 EXPERIMENTAL CONCERNS

There are some limitations in the experiment that could affect the results and the reproducibility of the study. The neurologist was blinded to the signals registered by the smartwatches. However, he had treated the patients during the recruitment phase. Hence, his evaluation of the videotapes could be biased. In future studies, a second neurologist with expertise in pathological tremor and movement disorders will be included in the analysis. The agreement between raters will be assessed with a correlation Cohen's kappa coefficient. Additionally, the location of the smartwatch in the distal forearm could affect the registry of tremor. The amplitude of the tremorous signal increases distally and it is maximum in the hand and fingers. Consequently, our smartwatch could be unable to register significant components of distal tremor on these body segments.

Our results reveal a slightly higher number of classification errors between the classes 1 and 2. This could be due to the imbalanced data from these classes, but also to the nature of the FTM tremor rating scale. In the case of the levels 1 "slight, intermittent" and 2 "moderate, intermittent", the rating provided by the neurologists can be extremely subjective. Other well-known clinical scales such as The Essential Tremor Rating Assessment Scale (TETRAS) rate tremor 0-4 in half-point intervals [14]. We will be able to reduce the variability of the rating and improve the accuracy of our tremor classifiers if we use this clinical scale in the future.

4.2 FUTURE WORKS

In future studies, we will improve our tremor classifier by including several neurologists to achieve a more precise rating of the tremor segments. We will also evaluate the performance of other classifiers such as Hidden Markov Models, Support Vector Machines, or k-Nearest Neighbors and extract new tremor features. The model will be implemented in the NetMD online platform. The platform will register the movements of the patient during a 24-hour monitoring and will provide the neurologists, patients and caregivers with an objective full tremor report. More information on the NetMD Project can be found at the link provided in Section 1.

In addition to this, we are interested in introducing new context awareness to our assessment of tremor. More specifically, we will train new classifiers to

identify several activities of the daily living. We will detect periods of rest and physical activity, including gait. Tasks of special interest are those related to dressing (putting a shirt on and buttoning it), grooming (combing hair or brushing teeth) or feeding (fine movements and gross movements with a spoon or a fork and a knife). A similar method was presented in [15] using signals registered by four IMUs located in the hand, forearm and arm of patients with ET.

With all this new information, the neurologists will be able to monitor and characterize not only episodes of tremor but also to identify the specific activity that the patient was performing when an onset of tremor was detected. This will be very valuable information to assess the evolution of the disease. It can also help them to detect the possible side effects that the medication can have on the daily activities of the patients and the tremor in their upper and lower limbs.

5 CONCLUSION

In this paper, we used nine features to train an automatic tremor severity classifier. The proposed method showed good accuracy in the identification of tremor severity in signals of gyroscopes and accelerometers. The method was able to assess the severity of tremor in 34 patients with ET. The system classified tremor instances as five levels of severity (0, 1, 2, 3, and 4), corresponding to the levels described by Fahn-Tolosa-Marin tremor rating scale.

The method can be implemented in a networked platform for the remote monitoring and assessment of movement disorders.

Acknowledgements

We would like to thank A. Clemotte and J.A. Gallego for their comments on the methodology. This work was possible thanks to the projects NetMD (RTC-2015-3967-1), NeuroMOD (DPI2015-68664-C4-1-R), and InterAAC (RTC-2015-4327-1). They are all financed by the Spanish Ministry of Economy, Industry and Competitiveness.

References

- [1] J. Benito-Leon and E. D. Louis, "Essential tremor: emerging views of a common disorder.," *Nat. Clin. Pract. Neurol.*, vol. 2, no. 12, p. 666–78; quiz 2p following 691, Dec. 2006.
- [2] G. Deuschl, P. Bain, M. Brin, Y. Agid, L. Benabid, R. Benecke, A. Berardelli, D. J. Brooks, R. Elble, S. Fahn, L. J. Findley, M.

- Hallett, J. Jankovic, W. C. Koller, P. Krack, A. E. Lang, A. Lees, C. H. Lucking, C. D. Marsden, J. A. Obeso, W. H. Oertel, W. Poewe, P. Pollak, N. Quinn, J. C. Rothwell, H. Shibasaki, P. Thompson, and E. Tolosa, "Consensus Statement of the Movement Disorder Society on Tremor," *Mov. Disord.*, vol. 13, no. S3, pp. 2–23, 1998.
- [3] K. L. Busenbark, J. Nash, J. P. Hubble, and W. C. Koller, "Is essential tremor benign?," *Neurology*, vol. 41, pp. 1982–3, 1991.
- [4] E. D. Louis, L. Barnes, S. M. Albert, L. Cote, F. R. Schneider, S. L. Pullman, and Q. Yu, "Correlates of Functional Disability in Essential Tremor," *Mov. Disord.*, vol. 16, no. 5, pp. 914–920, 2001.
- [5] R. J. Elble and J. McNames, "Using Portable Transducers to Measure Tremor Severity.," *Tremor Other Hyperkinet. Mov. (N. Y.)*, vol. 6, p. 375, 2016.
- [6] D. Haubenberger, G. Abbruzzese, P. G. Bain, N. Bajaj, J. Benito-León, K. P. Bhatia, G. Deuschl, M. J. Forjaz, M. Hallett, E. D. Louis, K. E. Lyons, T. A. Mestre, J. Raethjen, M. Stamelou, E. K. Tan, C. M. Testa, and R. J. Elble, "Transducer-based evaluation of tremor," *Mov. Disord.*, vol. 31, no. 9, pp. 1327–1336, 2016.
- [7] E. R. de Lima, A. O. Andrade, J. L. Pons, P. Kyberd, and S. J. Nasuto, "Empirical mode decomposition: a novel technique for the study of tremor time series.," *Med. Biol. Eng. Comput.*, vol. 44, no. 7, pp. 569–82, Jul. 2006.
- [8] G. Mostile, J. P. Giuffrida, O. R. Adam, A. Davidson, and J. Jankovic, "Correlation between Kinesia system assessments and clinical tremor scores in patients with essential tremor," *Mov. Disord.*, vol. 25, no. 12, pp. 1938–1943, Sep. 2010.
- [9] K. J. Kubota, J. A. Chen, and M. A. Little, "Machine learning for large-scale wearable sensor data in Parkinson's disease: Concepts, promises, pitfalls, and futures," *Mov. Disord.*, vol. 31, no. 9, pp. 1314–1326, 2016.
- [10] G. Rigas, A. T. Tzallas, M. G. Tsipouras, P. Bougia, E. E. Tripoliti, D. Baga, D. I. Fotiadis, S. Member, S. G. Tsouli, and S. Konitsiotis, "Assessment of Tremor Activity in the Parkinson's Disease Using a Set of Wearable Sensors," vol. 16, no. 3, pp. 478–487, 2012.
- [11] C. M. Fahn S, Tolosa E, *Clinical rating scale for tremor*, 2nd ed. Baltimore: Williams & Wilkins, 1993.
- [12] Hall. M, E. Frank, G. Holmes, B. Pfahringer, P. Reutemann, and I. H. Witten, "The WEKA Data Mining Software: An Update," *SIGKDD Explor.*, vol. 11, no. 1, 2009.
- [13] S. Lambrecht, J. A. Gallego, E. Rocon, and J. L. Pons, "Automatic real-time monitoring and assessment of tremor parameters in the upper limb from orientation data," *Front. Neurosci.*, vol. 8, no. July, p. 221, Jul. 2014.
- [14] R. J. Elble, "The Essential Tremor Rating Assessment Scale," *J Neurol Neuromed*, vol. 1, no. 4, pp. 34–38, 2016.
- [15] J. I. Serrano, S. Lambrecht, M. Dolores del Castillo, J. P. Romero, J. Benito-León, and E. Rocon, "Identification of activities of daily living in tremorous patients using inertial sensors," *Expert Syst. Appl.*, Apr. 2017.

INTERFAZ CEREBRO-ORDENADOR PARA EL CONTROL DE UNA SILLA DE RUEDAS A TRAVÉS DE DOS PARADIGMAS DE NAVEGACIÓN

Álvaro Fernández-Rodríguez, Francisco Velasco-Álvarez y Ricardo Ron-Angevin
Dpto. Tecnología Electrónica, ETSI Telecomunicación, Universidad de Málaga
afernandezrguez@uma.es, {rron, fvelasco}@dte.uma.es

Resumen

Una interfaz cerebro ordenador (BCI, de brain-computer interface) es una tecnología que permite a pacientes con disfunciones motoras severas usar sus señales electroencefalográficas para crear un canal de comunicación y controlar ciertos dispositivos. En este artículo será estudiada la aplicación de dos paradigmas para controlar una silla de ruedas mediante un sistema BCI: modo continuo e interruptor. Cinco usuarios sanos tomaron parte del estudio, de los cuales cuatro controlaron la silla de ruedas. Los resultados mostraron que el modo de control interruptor obtuvo un mejor rendimiento para los tramos de avance, mientras que el modo continuo fue más adecuado para mantener la silla de ruedas detenida. Esto podría indicar que un modo de control híbrido con estas ventajas podría ser el objetivo de futuras propuestas.

Palabras Clave: interfaz cerebro-ordenador (BCI), silla de ruedas, navegación, control.

1 INTRODUCCIÓN

Enfermedades como la esclerosis lateral amiotrófica (ELA) o lesiones del tronco encefálico pueden dar lugar a un deterioro de las funciones motoras de los pacientes afectados, lo que podría provocarles la necesidad de utilizar tecnología asistencial para mejorar su calidad de vida. Sin embargo, en algunos casos, la severa reducción de sus funciones motoras les puede llegar a impedir el uso de sistemas convencionales dependientes de dichas funciones, como las necesarias para manejar un joystick o incluso un eye-tracker. Por lo tanto, la solución podría residir en la utilización de sistemas que no requieran la capacidad motora del usuario para controlarlos. Precisamente, las interfaces cerebro-computadora (BCI, de *brain-computer interface*) corresponden a una tecnología que permite usar las señales electroencefalográficas (EEG) de los pacientes para crear un canal de comunicación entre ellos y el dispositivo que desean controlar sin necesidad de control muscular. Estos sistemas se han

implementado en el desarrollo de dispositivos tales como una matriz de letras para escribir [2], un sistema de control domótico [1] o una silla de ruedas (BCW, de *brain-controlled wheelchairs*) [6]. Concretamente, estudiar el control de una silla de ruedas será el objetivo del presente trabajo.

Desde la publicación de la primera silla de ruedas en 2005 por [10], se han realizado numerosas propuestas sobre diferentes aspectos del dispositivo, como la señal EEG registrada, las tareas que el usuario debe realizar, las propiedades específicas de la interfaz o el sistema de navegación implementado [3].

La presente propuesta, tal y como han hecho la mayoría de BCWs presentadas hasta la fecha, se ha basado en la señal EEG más utilizada para el control de una BCW en entornos reales, los ritmos sensorimotrices (SMR, de *sensorimotor rhythm*) [3]. Esta señal se basa en el fenómeno de la (de)sincronización asociada a eventos (ERD/ERS, de *event-related (des)synchronization*) y que origina cambios de amplitud producidos en el área de la corteza sensoriomotora en la banda μ (7-13 Hz) al realizar una tarea de imaginación motora (IM). De este modo, dicha señal puede ser modulada por el propio usuario para ser utilizada en un sistema BCI [7].

La taxonomía principal para clasificar las BCWs según el método de navegación empleado los divide entre sillas de bajo y alto nivel. Por un lado, en la navegación de bajo nivel, el control del dispositivo se logra mediante comandos simples de navegación, tales como 'avanzar' o 'girar a la derecha'. Por otro lado, la navegación de alto nivel permite a los usuarios ejecutar comandos como 'llévame a la cocina' o 'abandona esta habitación'. A pesar de que la navegación de alto nivel podría provocar una menor carga de trabajo y resultar más cómoda, ya que el usuario simplemente debe seleccionar los destinos, la presente propuesta se enmarca dentro de los sistemas de bajo nivel. Esto es debido a que dichos sistemas podrían resultar más apropiados para entornos incontrolados en los que la silla de ruedas deba poseer una adecuada flexibilidad para evitar posibles obstáculos o adaptar su trayectoria a nuevas

modificaciones en el entorno. Asimismo, dentro de los sistemas de bajo nivel se pueden establecer más divisiones basándose en el tipo de desplazamiento de la silla de ruedas, destacando el control discreto y continuo. En primer lugar, en el control discreto, la selección de un comando de navegación implica un movimiento prefijado como un giro de 45° o un avance de 1 m. En segundo lugar, en el control continuo, el usuario puede controlar la extensión del movimiento tras la selección de un comando de navegación como, por ejemplo, la amplitud del giro o la longitud del avance. En este tipo de manejo, lo normal es que el movimiento continúe siempre y cuando el usuario mantenga activo el comando.

El grupo BCI de la Universidad de Málaga (UMA-BCI) ha realizado una propuesta de control alternativa a las descritas anteriormente sobre el control de una silla de ruedas y un robot móvil en entornos virtuales: el paradigma de modo interruptor [11], [9]. En este paradigma, el usuario tiene que realizar la tarea correspondiente (por ejemplo, IM) para cambiar el estado de la silla de ruedas, es decir, realizar un desplazamiento o detener el movimiento, mientras que si el usuario quiere permanecer en el estado actual, es decir, continuar el desplazamiento o mantener la posición, tiene que ejecutar una tarea alternativa. Este control comparte con el paradigma continuo que el usuario puede controlar la distancia exacta de sus desplazamientos. Sin embargo, la principal diferencia entre el paradigma propuesto y el continuo es que, en este último, el usuario debe tener la capacidad de mantener ambas tareas de forma estable: una tarea para seleccionar el comando activo (por ejemplo, avanzar) y otra tarea para permanecer en reposo. Sin embargo, en el modo interruptor, el usuario debe tener la capacidad de realizar una tarea rápidamente (asociada al cambio de estado en el desplazamiento de la silla de ruedas), pero tener un control estable en la otra (asociada al mantenimiento del estado actual de la silla de ruedas). El funcionamiento de estos paradigmas se explicará con más detalle en la sección 2.3. *Aplicación de navegación*.

En definitiva, el objetivo del presente estudio es evaluar los paradigmas de control continuo e interruptor en una tarea de navegación básica con una BCW.

2 MÉTODO

2.1 PARTICIPANTES

Cinco usuarios sanos formaron parte del estudio (edad media de $19,75 \pm 0,5$ años; cuatro hombres, una mujer), estudiantes de la Universidad de Málaga. Ninguno tenía experiencia previa en el manejo de estos sistemas y fueron captados a través del uso de

publicidad en las redes sociales y el boca a boca, usando como reclamo el poder controlar una silla de ruedas con la mente y una recompensa económica de entre 5 y 10€ por participar, dependiendo de si completaban la primera fase de calibración del estudio. El experimento fue aprobado por el Comité Ético de Experimentación de la Universidad de Málaga y cumplió los criterios de la Declaración de Helsinki. Los participantes declararon en la hoja de consentimiento informado no tener ningún historial médico de desórdenes neurológicos o psiquiátricos, así como no tomar algún tipo de medicación de forma regular. Como criterio del diseño, en la tarea de calibración se estableció un límite máximo de error del 30% para poder continuar en el estudio. Este límite, anteriormente utilizado en [4], fue establecido para garantizar que los usuarios que pasaran a la siguiente prueba tuvieran un control aceptable de su señal SMR, la cual sería empleada para controlar la BCW.

2.2 ADQUISICIÓN DE DATOS Y PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL

Las señales EEG fueron registradas con una frecuencia de muestro de 200 Hz a través de dos canales laplacianos grandes (para más detalles, ver [5]), situados sobre las áreas somatosensoriales motoras izquierda y derecha utilizando la siguiente configuración de electrodos: C3, F3, P3, T7 y Cz para el canal laplaciano izquierdo, y C4, F4, P4, T8 y Cz para el canal laplaciano derecho. Los electrodos de tierra y referencia fueron situados en las posiciones AFz y Fz, respectivamente. Esta configuración fue realizada de acuerdo al sistema internacional 10/20. La señal fue amplificada con un amplificador actiCHamp (Brain Products GmbH, Munich, Germany). No fue utilizada ninguna técnica de detección de artefactos.

Como se mencionó anteriormente, los usuarios participaron en una fase de entrenamiento para proceder a la calibración del sistema (ver 2.5.1 *Calibración*). En esta tarea, se registró la señal EEG de cada participante llevando a cabo dos tareas mentales durante numerosos ensayos. Con estos datos, se calculó la banda reactiva de cada usuario y su error relacionado. Después de procesar la señal de cada participante, se seleccionaron aquellos con un error en la clasificación inferior al 30%, guardándose sus parámetros para ser utilizados en la posterior tarea con *feedback*. El procesado de los datos y la generación del *feedback* fue llevada a cabo por MATLAB y se basó en el procedimiento detallado en [8] que se explicará a continuación:

- a. *Obtención de la banda de frecuencia reactiva.*
La banda de frecuencia reactiva de cada participante fue automáticamente seleccionada

entre todas las posibles combinaciones de entre 5 y 17 Hz (con un mínimo de ancho de banda de 2 Hz). La búsqueda de la banda de frecuencia óptima fue limitada a la banda μ por motivos de simplicidad. Para cada intervalo de frecuencia probado, era llevado a cabo un procedimiento de extracción de características y clasificación que daba lugar a la obtención del porcentaje de error obtenido por el usuario en cada banda de frecuencia. Aquella banda de frecuencia con el mínimo error en la clasificación era la seleccionada como su correspondiente banda de frecuencia reactiva.

- b. *Extracción de características.* La extracción de características consistió en la estimación de la potencia media de la señal en cada uno de los dos canales EEG en el intervalo específico de frecuencia. Esta media era calculada a través de: i) la digitalización de la señal EEG y un filtrado paso banda tipo Butterworth de quinto orden, ii) el cálculo del cuadrado de cada muestra resultante y iii) el promediado de las consecutivas 100 muestras, dando una estimación de la potencia de banda para intervalos de 500 ms.
- c. *Clasificación.* Las características de cada uno de los canales para todos los ensayos fueron usadas para calcular el porcentaje de error para cada instante de tiempo posible a través de un análisis lineal discriminante (LDA, de *linear discriminant analysis*) y un promediado mediante validación cruzada de 10 iteraciones. De esta forma, se obtenía el porcentaje de error mínimo estimado para las características de potencia de la banda de frecuencia determinada.
- d. *Generación del feedback.* La banda de frecuencias anteriormente mencionada y sus características eran utilizadas para configurar el LDA, cuya clasificación resultante determinaba el valor del *feedback* 'L'. Este *feedback* era actualizado cada 31,25 ms.

2.3 APLICACIÓN DE NAVEGACIÓN

Puesto que el propósito de este estudio es realizar una comparación preliminar entre dos métodos de navegación, se ha decidido simplificar la interfaz de manera que el usuario sólo pudiera seleccionar un comando activo de navegación: avanzar con la BCW. De esta manera, además, queda eliminado cualquier otro factor de la interfaz que pudiera sesgar la comparación.

Han sido puestos a prueba dos modos de control, modo continuo y modo interruptor, sin embargo, el paradigma de selección del comando activo ha sido

similar en ambas interfaces. La tarea activa que fue utilizada como comando de control era la IM motora de mano derecha, siendo la tarea alternativa la realización de algún tipo de operación mental que fuera capaz de mantener al usuario concentrado y sin pensar en la tarea de IM (por ejemplo, cálculo matemático). Cuando el participante llevaba a cabo la tarea de IM, provocaba un estiramiento de una barra – distancia 'L', oculta al usuario – como resultado de la clasificación del LDA cada 31,25 ms. En caso de que el clasificador determinase que la tarea mental era IM de mano derecha, la barra se extendía; de otra manera, si el clasificador determinaba que el participante se encontraba realizando la tarea alternativa, la barra permanecía inmóvil y en un tamaño reducido. En caso de que el usuario deseara realizar una selección, éste debía mantener la barra por encima de un 'umbral de selección' y durante un tiempo superior a un 'tiempo de selección' (alrededor de 1 s). Si la distancia 'L' de la barra descendía por debajo de un 'umbral de selección' durante un tiempo menor que un 'tiempo de reinicio' (alrededor de 0,5 s), el 'tiempo de selección' continuaba acumulándose y no era reiniciado. Los parámetros de 'tiempo de selección' y 'tiempo de reinicio', así como 'el umbral de selección', podían ser configurados manualmente para facilitar o dificultar la capacidad de selección de los usuarios. A partir de este punto, lo que suceda dependerá del tipo de control del que disponga la silla de ruedas.

Por un lado, en el modo continuo, la tarea de IM de mano derecha serviría para mover la BCW, es decir, cuando el usuario realizaba dicha tarea, extendería la barra anteriormente mencionada y el dispositivo avanzaría de forma continuada siempre que la barra se encontrase por encima del 'umbral de selección'. En cambio, para detener o mantener la BCW en reposo, el usuario debería realizar la tarea alternativa y mantener la barra por debajo de dicho umbral.

Por otro lado, con respecto al modo interruptor, la tarea de IM de mano derecha serviría para cambiar el estado de la silla, como si de un interruptor convencional se tratase. En caso de que el usuario se encontrase en reposo y quisiera mover la silla, debería llevar a cabo la tarea de IM y, cuando empezase a moverse, cambiar a la tarea alternativa para continuar el movimiento. Una vez en movimiento, si el usuario deseara detener la silla, simplemente debería volver a ejecutar la tarea de IM.

2.4 SILLA DE RUEDAS ROBÓTICA

La BCW utilizada consistió en una modificación de una silla eléctrica Invacare Mistral3 equipada con una placa de control personalizada que emulaba el *joystick* de la silla de ruedas (figura 1). Dicha placa de control permitía el control de la silla de ruedas en

tiempo real y recibía información de dos codificadores rotatorios a través de un bus I2C. Además, era conectada a través de un puerto USB a la aplicación de control escrita en C que era ejecutada en el ordenador portátil. Esta aplicación recibía, vía conexión TCP, los comandos de navegación seleccionados por la aplicación ejecutada en MATLAB. Los dos codificadores rotatorios magnéticos AS5048 fueron colocados en las ruedas para garantizar, a través de un sistema de odometría, que la silla no se desviaba de su trayectoria en ningún momento. La velocidad del dispositivo era de aproximadamente 5,5 s para cada metro de avance (0,18 m/s).

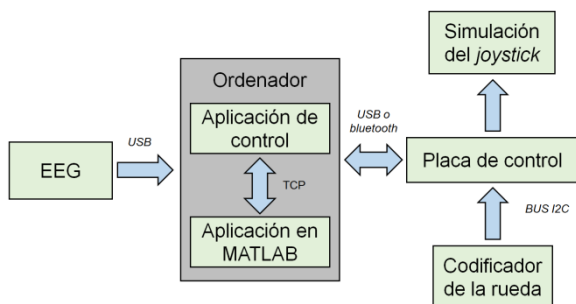


Figura 1. Esquema del sistema de control de la silla de ruedas.

2.5 PROCEDIMIENTO

El estudio fue llevado a cabo en una sola sesión de una duración total aproximada de dos horas y constaba de dos partes: i) una prueba inicial de calibración y ii) una tarea de control con la BCW (figura 2). Tanto la tarea de calibración como la de navegación fueron llevadas a cabo en una habitación espaciosa y sin tráfico de gente de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad de Málaga. Una vez el usuario llegaba a la zona de realización del experimento, se le explicaba con detalle en qué consistiría la prueba, firmaba la hoja de consentimiento informado y se procedía a la preparación de la prueba, incluyendo el montaje del EEG. Todo este proceso de preparación y montaje, previo al comienzo de la prueba, tenía una duración aproximada de 30 min.

2.5.1 Calibración

El participante era sentado en la BCW frente a un ordenador portátil de 15,6 pulgadas. La tarea que debía llevar a cabo consistía en la realización de dos tareas mentales para que el sistema acabase reconociendo los cambios producidos en la actividad cerebral del usuario cuando imaginaba cada una de estas tareas, con el fin de que posteriormente pudieran ser utilizadas como comandos de control en



Figura 2. Participante durante la ejecución de la tarea de control con la silla de ruedas.

la BCW. El paradigma de calibración utilizado ha sido presentado en anteriores experimento del grupo UMA-BCI [8]. Concretamente, la prueba consistía en lo siguiente: i) el usuario veía un coche estacionado en el medio de una carretera que, al comenzar el ensayo, arrancaba el motor, ii) tras 2 s, el coche empezaba a avanzar, dando lugar a la posible aparición de un charco de agua en el lado izquierdo de la pantalla que llegará a estar situado al lado del coche a partir de 4,25 s hasta el final del ensayo. En caso de que el charco de agua fuera presentado, el participante debía ejecutar la tarea de IM de mano derecha desde que comenzaba a ver el charco hasta que el sonido del motor del coche se apagase; si por el contrario, el charco no aparecía, el usuario debía concentrarse en realizar la tarea alternativa durante todo ese tiempo, es decir, en el intervalo de tiempo de 2 a 8 s (figura 3). La tarea fue dividida en cuatro bloques de 40 ensayos – 20 de IM y 20 de tarea alternativa, ordenados aleatoriamente – con el fin de no fatigar al usuario y que pudiera descansar entre bloques. Asimismo, el participante disponía de un breve descanso aleatorio de 0,5-3 s entre ensayos para poder acomodarse en la silla o realizar cualquier otro movimiento que no debiera realizar durante el ensayo.

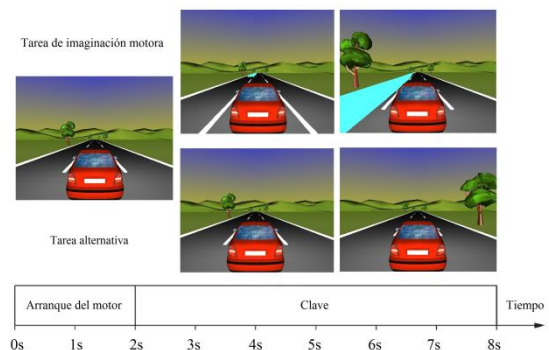


Figura 3. Temporalización de los ensayos de la tarea de calibración

La tarea tenía una duración aproximada de media hora, excluyendo el tiempo de descanso entre bloques. Los datos obtenidos de esta fase eran procesados posteriormente para la obtención de la banda de frecuencia reactiva, el porcentaje de error en la clasificación y los parámetros óptimos del clasificador. Como se mencionó anteriormente, fueron excluidos aquellos participantes que en esta tarea tuvieron una tasa de error en su banda de frecuencia reactiva superior al 30%. El entorno de esta tarea virtual fue desarrollado con VRML 2.0.

2.5.2 Tarea de control con la BCW

Aquellos participantes que completaron la tarea de calibración con un porcentaje de error inferior al 30% continuaron en el experimento para poder controlar la BCW. La tarea de navegación a realizar consistió en un tramo recto de un total de 8,4 m en el cual el usuario debía realizar tres secciones de avance de 2 m y dos de parada de 1,2 m (figura 4). El objetivo del participante fue completar los tramos de avance en el menor tiempo posible mientras que en los tramos de parada debía detener la BCW hasta un máximo de 60 s, no siendo necesario que realizara este tiempo de parada de una sola vez. Antes de realizar la tarea, el usuario disponía de un tiempo de entrenamiento manejando la BCW (alrededor de 10 minutos para cada tipo de control), de forma que quedase asegurado que comprendía el paradigma, pudiera practicar un poco y se acostumbrase a su desplazamiento.

Debido a que el participante era instruido para que permaneciera inmóvil durante la prueba, éste recibía determinadas indicaciones acústicas para saber cuándo entraba en cada tramo. Concretamente, cuando el usuario se encontraba aproximadamente a 40 cm de la zona de parada, se le indicaba por voz la palabra «llegando», mientras que la palabra utilizada una vez entraba a la zona de parada fue «dentro». Asimismo, si el usuario realizaba correctamente los 60 s dentro de dicho intervalo, recibía la orden «tiempo, continúa», indicándole que completó exitosamente el minuto de parada y que podía continuar el recorrido. Por el contrario, si el usuario abandonaba la zona de parada antes de los 60 s, se le indicaba mediante la orden «fuera, continúa» que debía completar el siguiente tramo de avance lo más rápido posible.

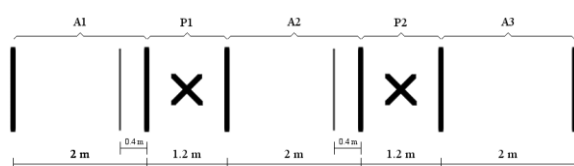


Figura 4. Recorrido de la tarea de navegación a completar con la silla de ruedas.

2.6 EVALUACIÓN

Además de las variables relativas a los tiempos y a las selecciones deseadas frente a las no deseadas, para conocer el rendimiento del usuario de forma general, se han creado dos variables que resumen la ejecución del participante para las secciones de avance y parada:

$$\text{Ratio de tiempo de avance} = \frac{At_{\min}}{At_o} \quad (1)$$

Siendo At_{\min} el tiempo mínimo requerido para completar los tramos de avance (11 s) y At_o el tiempo observado, es decir, el ejecutado por el usuario.

$$\text{Ratio de tiempo de parada} = \frac{Pt_o}{Pt_{\max}} \quad (2)$$

Siendo Pt_{\max} el tiempo máximo objetivo para completar los tramos de parada (60 s) y St_o el tiempo observado, es decir, el ejecutado por el usuario.

Estas ecuaciones recaen en la idea de que un buen rendimiento será aquel en el cual el usuario realice el mayor tiempo de parada posible (nunca superior a 60 s) y menor tiempo de avance (nunca inferior a 11 s, que es lo que tarda la silla en recorrer 2 m). De esta manera, la ecuación 1 registrará el rendimiento de los usuarios en los avances, mientras que la ecuación 2 lo hará en las paradas. Los valores de ambas ecuaciones indicarán mejores resultados cuanto más cercanos sean a uno.

3 RESULTADOS

3.1 CALIBRACIÓN

La banda de frecuencia reactiva y el error mínimo obtenido en la clasificación de cada usuario son mostrados en la tabla 1. De media, el mínimo error obtenido fue $20,38 \pm 8,08\%$. De los cinco participantes, sólo uno (S2) tuvo una tasa de error superior al punto de corte (30%) y fue eliminado del estudio.

3.2 TAREA DE NAVEGACIÓN

La tabla 2 muestra el tiempo que cada usuario estuvo ejecutando cada una de las dos tareas, así como el número de comandos de avance ejecutados, en cada sección del recorrido. Por tanto, de ella puede ser extraído el tiempo medio que emplearon los usuarios para completar un tramo de avance, el cual fue de $26,42 \pm 5,85$ s para el modo continuo y de $12,75 \pm 0,83$ s para el modo en interruptor. De igual manera, este

Tabla 1: Resultado de los participantes en la tarea de calibración.

Usuario	Banda de frecuencia reactiva(Hz)	Error mínimo (%)
S1	7-17	8,81
S2	13-16	31,31
S3	12-14	18,44
S4	5-15	20,94
S5	11-15	22,38
Media	9,6±3,44-15,4±1,14	20,38±8,08

tiempo medio puede ser calculado para las secciones de parada, ofreciendo como resultado un tiempo medio de $53,25 \pm 12,84$ s y $22,5 \pm 14,46$ s para los paradigmas de continuo e interruptor, respectivamente. Por otro lado, el número medio de comandos de avance requeridos para para completar los tramos de avance fueron de $3,91 \pm 1,1$ y $0,92 \pm 0,32$ para los modos continuo e interruptor, respectivamente. Nótese que el valor del número de comandos para el modo interruptor es incluso inferior a la unidad, lo que significa que algunas veces la silla realizó el tramo de avance sin realizar ninguna selección de avance; hay que tener en cuenta que si la silla no realiza ninguna parada desde que entra al tramo de avance, no es necesario que dicho comando sea seleccionado. Asimismo, estos valores en los tramos de parada fueron de $2,88 \pm 1,8$ selecciones no deseadas del comando de avance en el modo continuo y $1,13 \pm 0,48$ en el modo interruptor.

Finalmente, en cuanto a las medidas presentadas en el apartado 2.6 *Evaluación* relativas a los ratios de tiempo de avance y parada, podemos observar una tendencia, según la cual, el modo en interruptor ha resultado más eficaz en los tramos de avance,

mientras el modo continuo ha realizado considerablemente mejor los tramos de parada (figura 4).

4 CONCLUSIONES

Los resultados del estudio sugieren que cada modo de control posee características específicas que dan lugar a ciertas ventajas e inconvenientes que deben ser tenidos en cuenta a la hora de ser utilizados. Concretamente, en este estudio preliminar hemos observado una tendencia del modo interruptor a ofrecer un mejor rendimiento que el modo continuo en los tramos de avance, ya que el usuario podía recorrer una mayor distancia con una única selección de comando. No obstante, esta ventaja ha mostrado la posibilidad de ser un inconveniente en los tramos de parada, donde el modo continuo ha ofrecido mejores resultados.

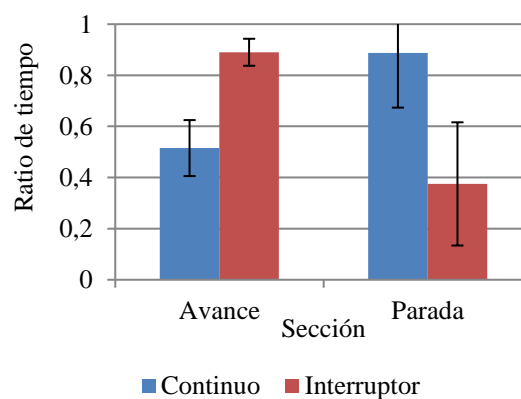


Figura 4. Variables de ratios de tiempo para los tramos de avance (ecuación 1) y los tramos de parada (ecuación 2) para ambos modos de control.

Tabla 2. Variables de rendimiento recogidas durante la tarea de navegación con la silla de ruedas.

Usuario	Manejo	Tiempo (s)										Selecciones de avance				
		A1		P1		A2		P2		A3		A1	P1	A2	P2	A3
		T _a	T _p	T _a	T _p	T _a	T _p	T _a	T _p	T _a	T _p					
S1	continuo	16	5	4	56	11	4	7	1	13	21	5	3	2	1	5
	interruptor	11	0	7	26	10	2	8	43	13	5	1	1	1	2	2
S3	continuo	13	4	6	54	11	0	2	58	16	17	2	2	0	1	5
	interruptor	11	0	8	14	10	0	7	2	12	2	1	1	0	1	1
S4	continuo	16	6	12	48	16	18	7	53	18	11	4	8	5	3	5
	interruptor	11	0	8	2	11	0	7	0	12	4	1	1	0	0	1
S5	continuo	12	0	5	55	22	28	8	50	18	21	1	3	6	2	7
	interruptor	11	0	8	26	11	4	8	6	11	2	1	1	1	2	1

Cada uno de los tramos de avance del recorrido ha sido denominado, del primero al último, como A1, A2 y A3, mientras que las secciones primera y segunda de parada se denotaron como P1 y P2. Asimismo, para cada uno de estos tramos se ha registrado el tiempo que la silla ejecutaba cada uno de los comandos, los de avance (T_a) y los de parada (T_p).

Para futuros estudios, sería conveniente volver a estudiar el control sobre los diferentes tipos de paradigmas con usuarios entrenados durante varias sesiones, ya que debe ser tenido en cuenta que todos los usuarios aquí presentados eran nuevos en el manejo de estas interfaces y el control de su señal EEG. Asimismo, podría resultar interesante estudiar la aplicación de nuevos paradigmas de navegación que consigan agrupar las ventajas de estos dos modos de control, de forma que el rendimiento del usuario y, por tanto, su experiencia durante el manejo resulte lo más adecuada posible.

Agradecimientos

Nos gustaría agradecer la asistencia de los participantes al estudio y la colaboración de Manon Bonnet en el diseño experimental y la realización de las pruebas. Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y por los fondos Europeos FEDER a través del proyecto LICOM (DPI2015-67064-R(MINECO/FEDER)), y la Universidad de Málaga.

Referencias

- [1] Corralejo R., Hornero R. and Álvarez D., *A Domestic Control System Using Brain-Computer Interface (BCI)*, vol. 6691 LNCS, no. PART 1. 2011.
- [2] Farwell L.A. and Donchin E., "Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related potentials," *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, vol. 70, no. 6, pp. 510–523, 1988.
- [3] Fernández-Rodríguez Á., Velasco-Álvarez F. and Ron-Angevin R., "Review of real brain-controlled wheelchairs," *J. Neural Eng.*, vol. 13, no. 6, p. 61001, 2016.
- [4] Kubler A., Neumann N., Kaiser J., Kotchoubey B., Hinterberger Y. and N. Birbaumer, "Brain-computer communication: Self-regulation of slow cortical potentials for verbal communication," *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 82, no. 11, pp. 1533–1539, 2001.
- [5] McFarland D. J., McCane L. M., David S. V. and Wolpaw J. R., "Spatial filter selection for EEG-based communication," *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.*, vol. 103, no. 3, pp. 386–394, Sep. 1997.
- [6] Millán J. D. R., Galán F., Vanhooydonck D., Lew E., Philips J. and Nuttin M., "Asynchronous non-invasive brain-actuated control of an intelligent wheelchair," *Proc. 31st Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. Eng. Futur. Biomed. EMBC 2009*, vol. 2009, pp. 3361–3364, 2009.
- [7] Pfurtscheller G., Brunner C., Schlögl A. and Lopes da Silva F. H., "Mu rhythm (de)synchronization and EEG single-trial classification of different motor imagery tasks," *Neuroimage*, vol. 31, no. 1, pp. 153–159, 2006.
- [8] Ron-Angevin R. and Díaz-Estrella A., "Brain-computer interface: Changes in performance using virtual reality techniques," *Neurosci. Lett.*, vol. 449, no. 2, pp. 123–127, 2009.
- [8] Ron-Angevin R., Aurélie D., Yvan M., Lespinet-Najib V. and André J.M., "Brain-computer interface: comparison of two control modes to drive a virtual robot," *Eur. Sci. J.*, vol. 7881, no. Im, pp. 177–189, 2015.
- [10] Tanaka K., Matsunaga K. and Wang H. O., "Electroencephalogram-based control of an electric wheelchair," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 21, no. 4, pp. 762–766, 2005.
- [11] Velasco-Álvarez F., Ron-Angevin R., Da Silva-Sauer L. and Sancha-Ros S., "Brain-computer interface: Comparison of two paradigms to freely navigate in a virtual environment through one mental task," *2010 5th Int. Conf. Broadband Biomed. Commun. IB2Com 2010*, no. IB2Com 2010, pp. 1–5, 2010.

Aprendizaje por Refuerzo para sistemas lineales discretos con dinámica desconocida: Simulación y Aplicación a un Sistema Electromecánico

Henry Díaz, Leopoldo Armesto, Antonio Sala
 {hendia@posgrado larmesto@idf asala@isa}.upv.es
 Universitat Politècnica de València,
 C/Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, España

Resumen

El aprendizaje por refuerzo es una técnica que se utiliza en la búsqueda de soluciones en sistemas de decisión secuencial. Una gran parte de los algoritmos usados en el aprendizaje por refuerzo se fundamentan en la programación dinámica, se considera que el aprendizaje por refuerzo es una extensión de la programación dinámica que proporciona soluciones sin la necesidad de conocer el modelo de comportamiento del sistema. Estas técnicas combinan algunas características del control óptimo y control adaptativo para el diseño de controladores realimentados. Se describen los algoritmos básicos del aprendizaje por refuerzo para la implementación de soluciones en sistemas discretos deterministas. Finalmente, se realizaron pruebas prácticas de la implementación del algoritmo de aprendizaje Q-Learning en un péndulo de un grado de libertad, con el objetivo de verificar si el algoritmo de aprendizaje converge y proporciona un controlador estabilizante.

Palabras clave Aprendizaje por refuerzo, Q-Learning, control óptimo, control adaptativo óptimo, programación dinámica .

1. Introducción

El aprendizaje por refuerzo (RL, *reinforcement learning*) es un conjunto de técnicas para resolver problemas de decisión secuenciales, en los cuales las decisiones son aplicadas al sistema con el objetivo de obtener una respuesta deseada[12][16]. Este tipo de problemas secuenciales aparecen en una amplia variedad de campos entre los que podemos mencionar el control automático, inteligencia artificial, robótica, control de procesos, entre otras[10]. El aprendizaje por refuerzo a diferencia de las técnicas de programación dinámica (DP, *dynamic programming*) no requiere del conocimiento del modelo[2][3]. Debido a los múltiples orígenes del RL es común encontrar en la literatura los mismos conceptos con diferentes definiciones, por ejemplo: programación neuro-dinámica[4], programación dinámica aproximada[10], programación dinámica adaptativa[9] entre otros.

Los principales elementos y su interacción del pro-

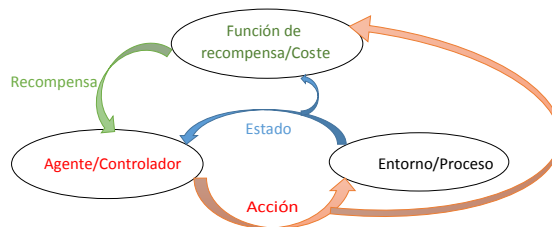


Figura 1: Elementos de la DP y RL y su flujo de interacción[5].

blema a resolver en la DP y RL son representados en la Figura 1. Se muestra la manera en la que un agente interactúa con el entorno mediante tres señales: una señal de estado del entorno, una señal de acción que permite al agente influenciar el estado del entorno y una señal escalar de recompensa, la cual proporciona al agente información sobre la calidad de la acción que acaba de realizar en el estado actual. En cada instante temporal, el agente recibe una medida del estado y realiza una acción. Como consecuencia de la acción realizada se produce una transición del entorno a un nuevo estado. Además se genera una señal de recompensa que evalúa la calidad de dicha transición. Entonces el agente recibe el nuevo estado y el ciclo completo se repite [12].

El agente selecciona la acción realizada en cada estado de acuerdo a una *política*. La política es una función que mapea los estados a acciones. El objetivo del agente es aprender una política que maximice la cantidad total de recompensa recibida, es decir, la recompensa acumulada a largo plazo[12][4][5].

Considerando las características que presentan los controladores proporcionados por las técnicas de RL se analizan e implementan algoritmos para sistemas discretos lineales de los cuales se desconoce su comportamiento dinámico[6][7].

El paper está estructurado de la siguiente forma: en la sección 2 se describen los conceptos básicos de la programación dinámica y el aprendizaje

por refuerzo. La sección 3 describe el aprendizaje por refuerzo para sistemas lineales discretos. En la sección 4 se realiza la simulación del aprendizaje en sistemas lineales. En la sección 5 se describe la aplicación del algoritmo de aprendizaje *Q-Learning* a un péndulo de un grado de libertad y se finaliza con la sección 6 de conclusiones.

2. Programación dinámica y aprendizaje por refuerzo

La programación dinámica es una parte fundamental de la teoría de control óptimo. En un problema de control óptimo, el objetivo es desarrollar un controlador que minimice una medida del comportamiento de un sistema dinámico a lo largo del tiempo [4], esta medida de comportamiento es evaluada con un índice de costo o función de valor y este índice o valor puede ser definido en términos de objetivos de optimalidad [8].

El RL tiene sus orígenes en el campo de la inteligencia artificial y se encuentra inspirado en los mecanismos de aprendizaje biológico. Específicamente, tiene sus raíces en el condicionamiento operante entre las diferentes formas que un individuo puede responder ante una misma situación, aquellas que estén acompañadas de una satisfacción (refuerzo positivo), estarán más firmemente conectadas a dicha situación de repetirse.

Los algoritmos DP para encontrar una política óptima requieren de un modelo MDP *Markov decision processes* incluyendo la dinámica de transición y la función de refuerzo [4], en general muchos problemas de decisión toman como marco de referencia los MDP incluidos los sistemas de control realimentados [7], un estudio detallado y amplio sobre MDP se puede consultar en [11].

Los algoritmos de RL son libres de modelo [12][4] lo que les hace muy útiles cuando la obtención del modelo de un proceso es demasiado dificultosa o muy costosa de ser implementada. Estos algoritmos usan datos obtenidos del proceso, estos datos pueden ser un conjunto de trayectorias, una simple trayectoria o un conjunto de muestras, lo que implica trabajar con un número limitado de datos que provienen proceso. Mientras los algoritmos de DP pueden usar el modelo para obtener cualquier número de muestras de transición de cualquier par estado-acción.

2.1. Criterios de optimalidad

El objetivo de los algoritmos de DP/RL es encontrar una política que maximice la recompensa obtenida por el agente a lo largo del tiempo. Escoger entre los criterios de optimalidad está relacionado

con el problema del aprendizaje. La mayor parte de los algoritmos de DP y RL emplean el criterio de optimalidad de horizonte infinito descontado (ecuación 1) debido a que posee propiedades teóricas que lo hacen más adecuado para el análisis matemático [4].

$$\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r_t \quad (1)$$

Donde r_t es el refuerzo instantáneo y $\gamma \in [0, 1)$ es el factor de descuento.

2.2. Función de valor y ecuaciones de Bellman

Las funciones de valor son el punto de unión entre el sistema y el criterio de optimalidad. Una *función de valor* es una estimación de la bondad que supone para un agente estar en un determinado estado cuando se sigue una política fija. Existen dos tipos de funciones de valor: función V , que estima la bondad de estar en un estado, y función Q que estima la bondad de realizar una acción en un estado. Usando el modelo de horizonte infinito con descuento la función de valor puede ser expresada así:

$$V^{\pi}(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k} \quad (2)$$

Una función de valor estado-acción similar:

$$Q^{\pi}(x, u) = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k} \quad (3)$$

Una de las características fundamentales de las funciones de valor es que satisfacen ciertas propiedades recursivas. Para cualquier política π y cualquier estado x la expresión en la ecuación 2 puede ser definida recursivamente en términos de la llamada *ecuación de Bellman* [2].

$$\begin{aligned} V^{\pi}(x) &= r_t + \gamma r_{t+1} + \gamma^2 r_{t+2} + \dots \\ &= r_t + \gamma V^{\pi}(x_{t+1}) \end{aligned} \quad (4)$$

La meta buscada es encontrar la *mejor* política, por ejemplo la que reciba el mayor retorno. Esto significa maximizar la ecuación 2 para todos los estados $x \in X$. Una *política óptima*, denotada π^* , es tal que $V^{\pi^*}(x) \geq V^{\pi}(x)$ para todo $x \in X$ y todas las políticas π . Se puede demostrar que la solución óptima $V^* = V^{\pi^*}$ satisface las siguiente ecuación:

$$V^*(x) = \max_u [r(x, u) + \gamma V^*(x')] \quad (5)$$

Esta ecuación se denomina la *Ecuación de optimalidad de Bellman*. Y establece que el valor de un estado bajo una política óptima debe ser igual

al retorno esperado para la mejor acción en ese estado. Para seleccionar una acción óptima dada la función de valor óptima V^* se puede aplicar la siguiente regla:

$$\pi^*(x) = \operatorname{argm\acute{a}x}_u [r(x, u) + \gamma V^\pi(x')] \quad (6)$$

La denominación de esta política es *política voraz* (*greedy policy*), se denota $\pi_{\text{greedy}}(V)$. Esta política selecciona la mejor acción usando la función de valor V . Análogamente el valor óptimo estado-acción es:

$$Q^*(x, u) = r(x, u) + \gamma \operatorname{m\acute{a}x}_{u'} Q^*(x', u') \quad (7)$$

Las *Q-funciones* son muy útiles debido a que hacen innecesaria la suma ponderada sobre las diferentes alternativas usando la función de transición. Esa es la razón por la cual en el enfoque libre de modelo donde no se conoce la función de transición ni la función de recompensa son aprendidas en lugar de las V -funciones. La relación entre Q^* y V^* esta dada por:

$$V^*(x) = \operatorname{m\acute{a}x}_u Q^*(x, u) \quad (8)$$

La selección de la acción óptima esta dada por:

$$\pi^*(x) = \operatorname{argm\acute{a}x}_u Q^*(x, u) \quad (9)$$

Es decir, la mejor acción es la acción que tiene la mayor utilidad esperada sobre la base de posibles estados próximos resultantes de tomar esa acción. Los algoritmos de DP y RL de acuerdo a como se obtienen la política óptima se clasifican en algoritmos de Iteración de función de valor (VI, *Value Iteration*), buscan el valor óptimo de la función de valor, que consiste en el máximo refuerzo de cada estado o de cada par estado-acción. Algoritmos de Iteración de política (PI, *Policy Iteration*), evalúan las políticas a través de construir sus funciones de valor (en lugar de la función de valor óptima), y utilizan estas funciones de valor para hallar nuevas y mejores políticas.

Hay varios métodos para la implementación de los algoritmos VI y PI. Los tres principales son: cálculo exacto, métodos de Monte Carlo y aprendizaje por diferencias temporales (TD, *Temporal difference*) [4][12][10]. Los dos últimos métodos pueden ser implementados sin el conocimiento de la dinámica del sistema, el método de diferencias temporales es el que se toma como referencia en las secciones posteriores.

2.2.1. Temporal difference

Temporal difference hace referencia a una familia de métodos para estimar, o predecir, la función V de una política fija, aunque como veremos en secciones posteriores, el concepto del aprendizaje TD puede ser extendido al caso de funciones Q [12]. En

los métodos TD la función V se estima en base a otras estimaciones previas, técnica que recibe el nombre de *bootstrapping* [12]. Cada vez que el agente realiza una acción el algoritmo TD utiliza la recompensa generada y la estimación actual de V para realizar una nueva estimación de acuerdo a la expresión:

$$V_{k+1}(x_k) = V_k(x_k) + \alpha_k [r_{k+1} + \gamma V_k(x_{k+1}) - V_k(x_k)] \quad (10)$$

donde $\alpha_k \in [0, 1]$ es la secuencia de tasas de aprendizaje que determina la cantidad con la que se actualiza el valor del estado x_k . El término entre corchetes, se conoce como diferencia temporal y da nombre al método, es la diferencia entre la nueva estimación de la función V , $r_{k+1} + \gamma V_k(x_{k+1})$, y la estimación en el instante temporal anterior, $V_k(x_k)$.

3. Aprendizaje por refuerzo y control adaptativo óptimo para sistemas lineales en tiempo discreto

El análisis físico de los sistemas utilizando por ejemplo la mecánica lagrangiana o la mecánica hamiltoniana que son una reformulación de la mecánica clásica proporcionan descripciones de los sistemas en términos de ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales. Discretizando obtenemos una representación de los sistemas en ecuaciones en diferencias [8].

Considerando un sistema discreto representado por las siguiente ecuación en diferencias

$$x_{k+1} = f(x_k) + g(x_k)u_k \quad (11)$$

donde el estado $x_k \in \mathbb{R}^n$ y la acción de control $u_k \in \mathbb{R}^m$. Una política de control esta definida como una función del espacio de estados al espacio de control $h(\cdot) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$. Lo que significa que por cada estado se define una acción de control dada por

$$u_k = h(x_k) \quad (12)$$

Una política es simplemente un controlador realimentado. A partir de definir una función costo se obtiene la función de valor [7][6][8].

$$V^h(x_k) = \sum_{i=k}^{\infty} \gamma^{i-k} (x_i^T H_x x_i + u_i^T H_u u_i) \quad (13)$$

con un factor de descuento $0 < \gamma \leq 1$, $H_x \in \mathbb{R}^{n_x \times n_x}$ y $H_u \in \mathbb{R}^{n_u \times n_u}$, son las matrices de pesos de la función de costo cuadrático y $u_k = h(x_k)$ una política de control realimentada. El costo de cada etapa

$$r(x_k, u_k) = x_k^T H_x x_k + u_k^T H_u u_k \quad (14)$$

es considerado como cuadrático en u_k para simplificar el desarrollo, pero puede ser cualquier función de control definida positiva. Se asume que el sistema es estabilizante en un conjunto $\Omega \in R^n$, lo que significa que existe una política de control $u_k = h(x_k)$ que el sistema en lazo cerrado $x_{k+1} = f(x_k) + g(x_k)h(x_k)$ es asintóticamente estable en Ω . Una política se dice que es *admisibile* si esta es estabilizante y proporciona un costo finito $V^h(x_k)$ para la trayectorias en Ω [8][1]. Para sistemas determinísticos discretos, el valor óptimo está dado por la ecuación de optimalidad de Bellman

$$V^*(x_k) = \min_{h(\cdot)} (r(x_k, h(x_k)) + \gamma V^*(x_{k+1})) \quad (15)$$

Que es justamente la ecuación Hamilton-Jacobi-Bellman(HJB)[8] en tiempo discreto. Y tenemos que la política óptima es

$$h^*(x_k) = \arg\min_{h(\cdot)} (r(x_k, h(x_k)) + \gamma V^*(x_{k+1})) \quad (16)$$

Para el regulador lineal cuadrático para sistemas discretos(DT LQR) tenemos,

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad (17)$$

$$V^h(x_k) = \frac{1}{2} \sum_{i=k}^{\infty} \gamma^{i-k} (x_i^T H_x x_i + u_i^T H_u u_i) \quad (18)$$

Notar que desde el punto de vista de los sistemas de control el objetivo que busca el aprendizaje por refuerzo es encontrar una política óptima que minimice el coste acumulado.

Iteración de política(PI) usando aprendizaje por diferencias temporales[7]

Inicialización

Seleccionar cualquier política de control admisible $h_0(x_k)$.

Hacer para $j = 0$ hasta converger

Evaluación de Política

$$V_{j+1}(x_k) = r(x_k, h_j(x_k)) + \gamma V_{j+1}(x_{k+1}) \quad (19)$$

Mejora de Política

$$h_{j+1}(x_k) = \arg\min_{h(\cdot)} (r(x_k, h(x_k)) + \gamma V_{j+1}(x_{k+1})) \quad (20)$$

o

$$h_{j+1}(x_k) = -\frac{\gamma}{2} R^{-1} g^T(x_k) \nabla V_{j+1}(x_{k+1}) \quad (21)$$

donde $\nabla V(x) = \delta V(x)/\delta x$ es el gradiente de la función de valor, interpretado aquí como un vector columna. En el método de iteración de la función de valor se realiza de manera similar, pero el procedimiento de evaluación de la política se realiza de la siguiente forma.

Iteración de la función de valor(VI) usando aprendizaje por diferencias temporales[7]

Actualización de la función valor en cada paso

Actualización del valor usando

$$V_{j+1}(x_k) = r(x_k, h_j(x_k)) + \gamma V_j(x_{k+1}) \quad (22)$$

En VI se puede seleccionar cualquier política de control inicial $h_0(x_k)$, no necesariamente admisible o estabilizante.

3.1. Aproximación de la función de valor

Para implementaciones prácticas de PI y VI para sistemas dinámicos con infinitos espacios de estado y de acciones es aproximar la función de valor usando una estructura de un aproximador adecuado en términos de parámetros desconocidos[6]. Así, los parámetros desconocidos son ajustados en línea exactamente como en un sistema de identificación. Esta idea de la *aproximación de la función de valor* (VFA) fue usada por Werbos[15][14] y llamada programación dinámica aproximada(ADP) o programación dinámica adaptativa. Esta fue usada por Bertsekas y Tsitsiklis[4] y la llamó programación neurodinámica.

En el caso del LQR es conocido que el valor es cuadrático en el estado para alguna matriz *kernel* P [8].

$$V(x_k) = \frac{1}{2} x_k^T P x_k = \frac{1}{2} (vec(P))^T (x_k \otimes x_k) \equiv \bar{p}^T \phi(x_k) \quad (23)$$

El producto de Kronecker \otimes permite escribir esta forma cuadrática como una lineal en vector de parámetros $\bar{p} = vec(P)$, que se forma apilando la columnas de la matriz P [7]. El vector $\phi(x_k) = \bar{x}_k = x_k \otimes x_k$ es el vector polinomial cuadrático que contiene todos los posibles pares de productos de n componentes de x_k . Notar que P es simétrica y tiene solamente $n(n+1)/2$ elementos independientes, removiendo los términos redundantes en $x_k \otimes x_k$ para definir un conjunto de base cuadrática $\phi(x_k)$ con $n(n+1)/2$ elementos independientes[7][6].

Se asume que la ecuación de Bellman tiene una solución local suave.

$$V(x) = \sum_{i=1}^{\infty} w_i \varphi_i(x) \equiv W^t \phi(x) + \varepsilon_L(x) \quad (24)$$

donde el vector de base $\phi(x) = [\varphi_1(x) \ \varphi_2(x) \ \dots \ \varphi_L(x)] : R^n \rightarrow R^L$ y $\varepsilon_L(x)$ converge uniformemente a cero mientras el número de términos $L \rightarrow \infty$ [7][5][3].

3.2. Control adaptativo óptimo en sistemas lineales discretos con dinámica desconocida

El método de RL *Q-learning* proporciona un algoritmo de control adaptativo que converge en línea a la solución de control óptima para sistemas en los que se desconoce completamente su dinámica. Este método resuelve la ecuación de Bellman y las ecuación HJB en tiempo real a través de la medición de datos a lo largo de las trayectorias del sistema, sin conocer la dinámica $f(x_k), g(x_k)$ [7].

Q-learning[13] es un método simple de RL que trabaja para sistemas desconocidos, esto es, para sistemas los cuales se desconoce completamente su dinámica. *Q-learning* aprende la función Q usando el método de diferencias temporales (TD) y realizando una acción u_k y midiendo en cada etapa el resultado del conjunto de datos de experiencia (x_k, x_{k+1}, r_k) consistentemente en el estado actual, el estado próximo y el costo resultante[8].

El algoritmo *Q-Learning* puede ser fácilmente desarrollado para sistemas dinámicos discretos usando aproximaciones de la función Q , en [8] se desarrolla y se muestra las principales ecuaciones para el *Q-Learning* en sistemas discretos.

Tomando como referencia [7], tenemos que para un sistema no lineal la función Q es parametrizada como

$$Q(x, u) = W^T \phi(z)$$

para algún vector de parámetros desconocido W y un conjunto de vectores base $\phi(z)$. Para un DT LQR, $\phi(z)$ es un conjunto base cuadrático formado por componentes de estado y entrada. Por lo tanto, el error TD es

$$e_k = -W^T \phi(z_k) + r(x_k, u_k) + \gamma W^T \phi(z_{k+1}) \quad (25)$$

sobre el cual los algoritmos PI y VI pueden basarse. Considerando el algoritmo PI el paso de evaluación de una función Q es

$$W_{j+1}^T (\phi(z_k) - \gamma \phi(z_{k+1})) = r(x_k, h_j(x_k)) \quad (26)$$

y el paso de mejora de la política es

$$h_{j+1}(x_k) = \underset{u}{\operatorname{argmín}} (W_{j+1}^T \phi(x_k, u)), x \in X \quad (27)$$

Q-learning usando VI esta dado por

$$W_{j+1}^T \phi(z_k) = r(x_k, h_j(x_k)) - \gamma W_j^T \phi(z_{k+1}) \quad (28)$$

y la ecuación 27. Estas ecuaciones no requieren conocimiento de la dinámica $f(\cdot), g(\cdot)$.

Para implementaciones en línea, para resolver la ecuación 26 se puede usar LS por lotes o RLS para

el vector de parámetros W_{j+1} obteniendo el vector de regresión $\phi(z_k) - \gamma \phi(z_{k+1})$, o en 28 usando el vector de regresión $\phi(z_k)$. Los datos observados en cada instante de tiempo son $(z_k, z_{k+1}, r(x_k, u_k))$ con $z_k \equiv [x_k^T u_k^T]^T$, con $u_{k+1} = h_j(x_{k+1})$ y $h_j(x_k)$ la política actual. Se debe agregar ruido de exploración a la entrada de control para obtener una excitación persistente.

Después de la convergencia de los parámetros de la función Q , la actualización de la acción es realizada. Esto se realiza fácilmente sin conocer la dinámica del sistema debido a que la función Q contiene u_k como uno de sus argumentos así que $\partial(W_{j+1}^T \phi(x_k, u))/\partial u$ puede ser explícitamente calculada.

$$\frac{\partial Q(x, u)}{\partial u} = \left(\frac{\partial z}{\partial u}\right)^T \left(\frac{\partial \phi(z)}{\partial z}\right)^T$$

$$W = [0_{m,n} \quad I_m] \nabla \phi^T W$$

donde $0_{m,n} \in R^{m \times n}$ es una matriz de ceros. El vector de base $\phi(z) = z \otimes z \in R^{n+m^2}$ es el vector polinomial cuadrático que contiene todos los posibles pares de productos de los $n+m$ componentes de z . Se define $N = n+m$, entonces

$$\nabla \phi^T = \frac{\partial \phi^T}{\partial z} = (I_N \otimes z + z \otimes I_N)^T \in R^{N \times N^2} \quad (29)$$

4. Simulaciones implementadas

Las simulaciones realizadas en esta sección consideran sistemas discretos lineales en los cuales la dinámica del sistema no es conocida.

4.1. Aprendizaje por refuerzo para un Sistema lineal discreto de segundo orden usando PI (*Policy Iteration*).

En esta simulación se muestra el uso del algoritmo PI para resolver la DT ARE sin conocer la dinámica del sistema, es decir, para el caso del LQR se desconoce las matrices A y B del sistema. Las matrices solo se usan para generar las trayectorias y adquirir los datos que el algoritmo requiere. Por lo tanto, el modelo del sistema a considerar aquí es $x_{k+1} = Ax_k + Bu_k$, donde

$$A = \begin{bmatrix} 0.9039 & -0.1903 \\ 0.0095 & 0.9990 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.0095 \\ 0 \end{bmatrix}$$

que representa un modelo discretizado de un sistema sencillo masa-muelle-amortiguado Figura 2. La solución de DT ARE con los pesos de la función de coste $H_x = \operatorname{diag}(1 \ 1)$, $H_u = 1$ y $\gamma = 1$ es

$$P_{DARE} = \begin{bmatrix} 5.7529 & 2.5143 \\ 2.5143 & 130.338 \end{bmatrix}$$

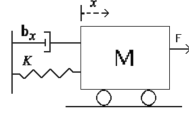


Figura 2: Sistema de masa, muelle y amortiguador

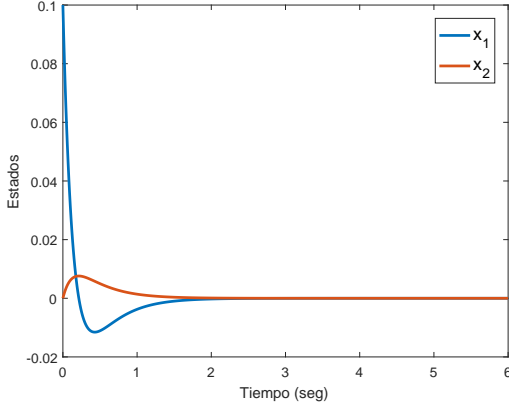


Figura 3: Variables de estado del sistema simulado

Definimos la aproximación de la función de valor considerando un modelo de coste cuadrático en la acción de control:

$$Q(x_k, u_k) = W^T \phi(x_k, u_k)$$

$$\phi(x_k, u_k) = [x_{k1}^2 \quad x_{k1}x_{k2} \quad x_{k1}u_k \quad x_{k2}^2 \quad x_{k2}u_k \quad u_k^2]^T$$

$$W = [w_1 \quad w_2 \quad w_3 \quad w_4 \quad w_5 \quad w_6]^T$$

La acción de control óptima es:

$$u_k^* = -\frac{1}{2}w_6^{-1}[w_3 \quad w_5][x_{k1} \quad x_{k2}]^T$$

La implementación online de PI se realizó usando el método de mínimos cuadrados recursivos (*Recursive-Least-Squares, RLS*). Las trayectorias de los estados se muestran en la Figura 3, donde se evidencia como los estados son regulados a cero como es deseable. Los valores finales de la matriz P son:

$$P_{RL} = \begin{bmatrix} 5.7529 & 2.5143 \\ 2.5143 & 130.3380 \end{bmatrix}$$

El algoritmo implementado es un algoritmo adaptativo de control que identifica la función Q a través de técnicas RLS. Para su implementación no se requiere de las matrices de la dinámica del sistema (A, B). El algoritmo efectivamente resuelve la ecuación algebraica de Riccati en línea a tiempo real usando datos $(x_k, u_k, x_{k+1}, u_{k+1})$ medidos en tiempo real en cada instante k . Es necesario agregar ruido de exploración a la señal de control para garantizar una excitación persistente para lograr la convergencia usando RLS.

4.2. Aprendizaje por refuerzo para un sistema lineal discreto usando VI (Value Iteration)[7].

En esta simulación se muestra el uso del algoritmo VI para resolver la DT ARE sin conocer la dinámica del sistema. Un modelo lineal puede ser usado para representar el sistema dinámico alrededor de un punto de operación específico con una carga de valor constante. El problema se incrementa con el hecho de que los parámetros de la planta no son conocidos, mientras lo que se busca es una solución de control óptima. El modelo del sistema a considerar aquí es $\dot{x} = Ax + Bu$. Los parámetros del sistema en tiempo continuo se seleccionan aleatoriamente con rango de operación específicos, tenemos

$$A = \begin{bmatrix} -0.0665 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & -3.663 & 3.663 & 0 \\ -6.8681 & 0 & -13.7363 & -13.7363 \\ 0.6 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 13.7355 \\ 0 \end{bmatrix}$$

El sistema se ha discretizado con un periodo de muestreo de $T = 0.01s$ y los pesos de la función de costo: $H_x = I$, $H_u = I$, y $\gamma = 1$. La solución es:

$$P_{DARE} = \begin{bmatrix} 0.4805 & 0.4772 & 0.0604 & 0.4771 \\ 0.4772 & 0.7892 & 0.1240 & 0.3855 \\ 0.0604 & 0.1240 & 0.0567 & 0.0304 \\ 0.4771 & 0.3855 & 0.0304 & 2.3509 \end{bmatrix}$$

La implementación de VI se realizó usando mínimos cuadrados por lotes, es así que la ecuación de Riccati es resuelta con los datos $(x_k, x_{k+1}, r(x_k, u_k))$. La aproximación de la función de valor es:

$$Q(x_k, u_k) = W^T \phi(x_k, u_k)$$

$$\phi(x_k, u_k) = [x_{k1}^2, x_{k1}x_{k2}, x_{k1}x_{k3}, x_{k1}x_{k4}, x_{k1}u_k, x_{k2}^2, x_{k2}x_{k3}, x_{k2}x_{k4}, x_{k2}u_k, x_{k3}^2, x_{k3}x_{k4}, x_{k3}u_k, x_{k4}^2, x_{k4}u_k, u_k^2]^T$$

$$W = [w_1 \quad w_2 \quad w_3 \quad \dots \quad w_{14} \quad w_{15}]^T$$

La acción de control óptima es:

$$u_k^* = -\frac{1}{2}w_{15}^{-1}[w_5 \quad w_9 \quad w_{12} \quad w_{14}][x_{k1} \quad x_{k2} \quad x_{k3} \quad x_{k4}]^T$$

Las trayectorias de los estados del sistemas se muestran en la Figura 4, donde se observa que los estados son regulados a cero. Los valores finales de los parámetros estimados para P son

$$P_{RL} = \begin{bmatrix} 0.4753 & 0.4770 & 0.0602 & 0.4769 \\ 0.4770 & 0.7837 & 0.1238 & 0.3852 \\ 0.0602 & 0.1238 & 0.0513 & 0.0302 \\ 0.4769 & 0.3852 & 0.0302 & 2.3457 \end{bmatrix}$$

La Figura 5 muestra la convergencia de P_k a sus valores óptimos P^* durante el proceso de aprendizaje. Para su implementación no se requiere de las matrices de la dinámica del sistema (A, B). El

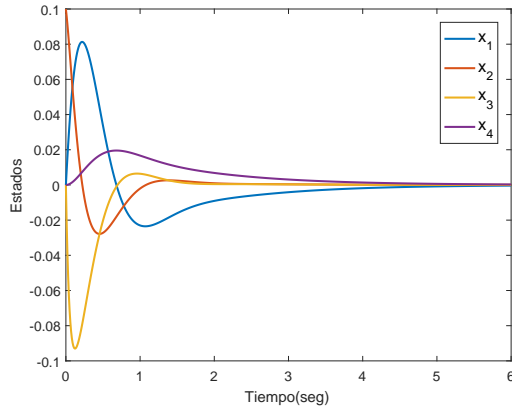
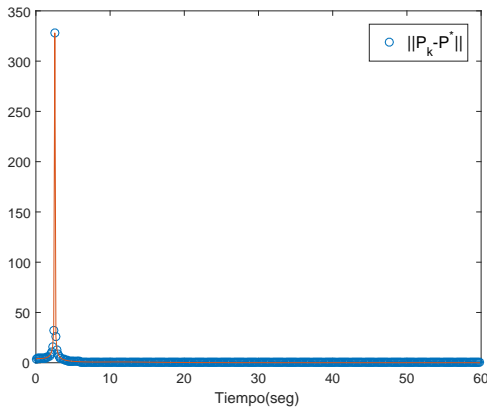


Figura 4: Variables de estado del sistema simulado

Figura 5: Convergencia de P_k a su valor óptimo P^*

algoritmo efectivamente resuelve la ecuación algebraica de Riccati en línea a tiempo real usando datos $(x_k, u_k, x_{k+1}, u_{k+1})$ medidos en tiempo real en cada instante k . Es necesario agregar ruido de exploración a la señal de control para garantizar una excitación persistente para lograr la convergencia usando LS.

5. Experimentación real: Péndulo de un grado de libertad(1DoF)

En esta sección se describe la implementación práctica del algoritmo de aprendizaje *Q-Learning* en un péndulo de un grado de libertad, con el objetivo de verificar si el algoritmo de aprendizaje nos proporciona una ganancia estabilizante, considerando que no se ha tomado en cuenta para la función de coste las no linealidades existentes en experimentos prácticos. Las implementaciones reales de los algoritmos se han hecho sobre un banco de experimentos mostrado en la Figura 6. El banco de pruebas está formado por un péndulo de 1DoF cuyo actuador es un motor DC, el péndulo posee un sensor de posición de efecto hall en el primer eslabón. El experimento diseñado se ha definido

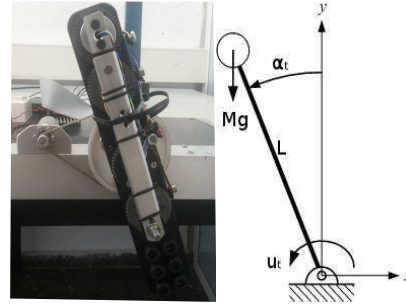
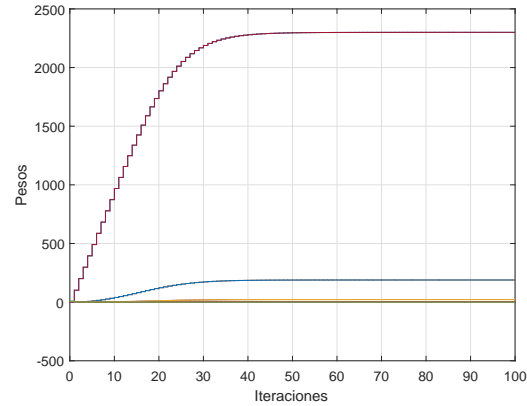
Figura 6: Sistema implementado para pruebas de aprendizaje *Q-Learning*.

Figura 7: Convergencia de la matriz de parámetros del aprendizaje usando VI.

como la búsqueda del controlador con realimentación del estado para una trayectoria del péndulo desde una posición inicial de $-\frac{\pi}{3} [rad]$ hasta su posición arriba $0 [rad]$. En la etapa de exploración se adquirieron 3000 muestras a un periodo de adquisición de $T = 10ms$. Los datos obtenidos en la exploración ingresan al algoritmo de aprendizaje implementado *Q-Learning*, el factor de descuento es $\gamma = 0.98$ y las matrices de ponderación del índice de coste usadas son:

$$H_x = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}, H_u = 0.1$$

La aproximación de la función de valor es $Q(x_k, u_k) = W^T \phi(x_k, u_k)$ y la Figura 7 muestra la convergencia del vector de pesos W . La Figura 8 muestra la evolución de la posición del péndulo usando el controlador aprendido y comparándolo con un controlador proporcional-derivativo(PD).

6. Conclusiones

El aprendizaje por refuerzo proporciona soluciones a problemas de decisión secuencial, los cuales aparecen en una amplia variedad de campos entre ellos el de los sistemas de control. Gran parte de los algoritmos de aprendizaje por refuerzo se basan en las técnicas de programación dinámica, y la

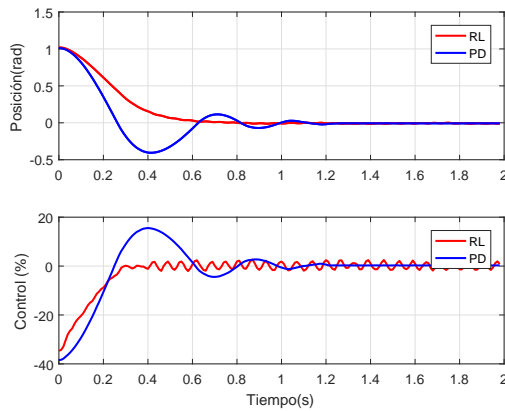


Figura 8: Evolución de la posición del sistema y la acción de control del controlador *Q-Learning* y de un controlador PD implementado desde la condición inicial $x_0 = [-\frac{\pi}{3} \ 0]^T$.

diferencia fundamental yace en que la DP requiere de un modelo de comportamiento mientras que RL no requiere del conocimiento del modelo para proporcionar una solución, específicamente en el caso de los sistemas de control proporcionan un controlador estabilizante y óptimo. El aprendizaje por refuerzo nos permite diseñar controladores adaptativos que convergen a soluciones óptimas usando los datos medidos a lo largo de las trayectorias del sistema. Las simulaciones también permite concluir que la técnica de aprendizaje *Q-Learning* resuelve la ecuación de *Riccati*, en nuestro caso en las simulaciones de manera *online* y en el experimento real de manera *offline*, sin el conocimiento del comportamiento dinámico del sistema, simplemente observando los datos medidos (exploración) a lo largo de las trayectorias del sistema.

7. Agradecimientos

Agradecemos al Ministerio de Economía de España, la Unión Europea DPI2016-81002-R (AEI/FEDER, UE), y al Gobierno de Ecuador (Beca SENESCYT).

Referencias

- [1] Asma Al-Tamimi, Frank L Lewis, and Murad Abu-Khalaf. Model-free q-learning designs for linear discrete-time zero-sum games with application to h-infinity control. *Automatica*, 43(3):473–481, 2007.
- [2] Richard Bellman. *Dynamic programming*. Courier Corporation, 2013.
- [3] Dimitri P Bertsekas and Bertsekas. *Dynamic programming and optimal control*, volume 1. Athena Scientific Belmont, MA, 1995.

- [4] Dimitri P Bertsekas and Bertsekas. *Neuro-Dynamic Programming*, volume 1. Athena Scientific, 1996.
- [5] Lucian Busoniu, Robert Babuska, Bart De Schutter, and Damien Ernst. *Reinforcement learning and dynamic programming using function approximators*, volume 39. CRC press, 2010.
- [6] Frank L Lewis and Draguna Vrabie. Reinforcement learning and adaptive dynamic programming for feedback control. *Circuits and Systems Magazine, IEEE*, 9(3):32–50, 2009.
- [7] Frank L Lewis, Draguna Vrabie, and Kyriakos G Vamvoudakis. Reinforcement learning and feedback control: Using natural decision methods to design optimal adaptive controllers. *Control Systems, IEEE*, 32(6):76–105, 2012.
- [8] Vrabie D. L. Lewis, F. L. and V. L. Syrmos. *Optimal control*. John Wiley & Sons, 2012.
- [9] John J Murray, Chadwick J Cox, George G Lendaris, and Richard Sacks. Adaptive dynamic programming. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 32(2):140–153, 2002.
- [10] Warren B Powell. *Approximate Dynamic Programming: Solving the curses of dimensionality*, volume 703. John Wiley & Sons, 2011.
- [11] Martin L Puterman. *Markov decision processes: discrete stochastic dynamic programming*. John Wiley & Sons, 2014.
- [12] Richard S Sutton and Andrew G Barto. *Reinforcement learning: An introduction*, volume 1. MIT press Cambridge, 1998.
- [13] Christopher JCH Watkins and Peter Dayan. Q-learning. *Machine learning*, 8(3-4):279–292, 1992.
- [14] Paul J Werbos. A menu of designs for reinforcement learning over time. *Neural networks for control*, pages 67–95, 1990.
- [15] Paul J Werbos. Approximate dynamic programming for real-time control and neural modeling. *Handbook of intelligent control: Neural, fuzzy, and adaptive approaches*, 15:493–525, 1992.
- [16] Marco Wiering and Martijn van Otterlo. *Reinforcement Learning: State-of-the-art*, volume 12. Springer Science & Business Media, 2012.

Diseño de sistemas de control en cascada clásico y borroso para el seguimiento de trayectorias

Javier G. González ^{a,*}, Rodolfo E. Haber ^b, Fernando Matia ^b, Marcelino Novo ^c

^a Departamento de Control Automático. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oriente. Ave. Las Américas s/n. 90400. Cuba.

^b Centro de Automática y Robótica (UPM-CSIC). Ctra. De Campo Real km. 0.200. La Poveda. 28500. Madrid. España.

^c Fagor Automation S. Coop. San Andres Auzoa, 19, 20500 Arrasate-Mondragón, Guipúzcoa.

Resumen

Los nuevos procesos de microfabricación imponen nuevos requisitos de precisión y robustez en los sistemas de control de posición y trayectoria, lo que abre nuevas líneas de investigación en el campo del modelado y el control, y la necesidad de evaluar técnicas de control inteligente tales como el control borroso. En este trabajo, se presenta por una parte el modelado clásico de partes eléctricas y mecánicas consideradas como un sistema de múltiples masas acopladas mediante una transmisión elástica y amortiguamiento, en presencia de la fricción y la holgura, dos no linealidades duras. Además, se muestra el diseño de un controlador a partir de un modelo paramétrico dependiente de la frecuencia de resonancia y del amortiguamiento. Como paso inicial del estudio, se diseña un sistema de control en cascada dotado de componentes anticipativas que es el esquema más utilizado en la industria. Con vistas a evaluar el alcance de las no linealidades en la ley de control, se sintetiza un control borroso en cascada equivalente a partir del método propuesto por Matia et al. 1992. Para evaluar el comportamiento del sistema de control, se consideraron incertidumbres en parámetros tales como la frecuencia de resonancia, el amortiguamiento y el ancho de la zona muerta de la holgura y se realizaron simulaciones considerando trayectorias circulares. Algunas cifras de mérito tales como la integral del valor absoluto del error en el tiempo (ITAE), el error máximo absoluto (MAE) y la integral del valor absoluto de la señal de control (IAU) se utilizaron en el estudio comparativo de ambos controladores en cascada. El estudio permitió comprobar que no hay diferencias significativas en el comportamiento de ambos sistemas de control (cascada clásico y cascada borroso). Copyright © CEA.

Palabras Clave:

control en cascada, control borroso, cifras de mérito, optimización, Nelder-Mead, microfabricación, fricción, holgura.

1. Introducción

Las especificaciones y los requisitos de acabado superficial y dimensional en la microfabricación, han obligado no solo al rediseño de los sistemas electromecánicos, sino también a mejorar la precisión y a minimizar los errores máximos de seguimiento en los ejes de las máquinas. Por tanto, es muy importante diseñar sistemas de control de posición y trayectoria con transitorios rápidos y errores de seguimiento del orden de décimas de micra. El objetivo de la microfabricación es crear microsistemas o micro componentes (típicamente de tamaños inferiores a 1cm) con microcomponentes (1-100 μm) de modo que se cumplan las

especificaciones y los requisitos funcionales de dichos microsistemas (Haber et al., 2002).

Desde el punto de vista del modelado, algunos sistemas electromecánicos han sido analizados bajo la simplificación y suposición de considerarlos como sistemas de una masa, como en (Yeh et al., 2009), (Xi et al., 2009) y (Xi et al., 2010). Estos resultados han demostrado que aún en la actualidad las prestaciones de los sistemas de control son insuficientes en presencia de no linealidades tales como la fricción y la holgura. Los exigentes requisitos de precisión en el seguimiento de referencias y de comportamiento transitorio unido a la influencia de las dinámicas no modeladas ponen en evidencia las carencias de estos diseños. En el sistema de dos masas se tiene en consideración la torsión elástica de los ejes o barras de transmisión largos, lo que explica la tendencia a la oscilación de los sistemas mecánicos. En

* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: javier@uo.edu.cu (Primer Autor),
rodolfo.haber@car.upm-csic.es (Segundo Autor)

(Sabatier et al., 2003) se muestra con claridad el modelado y la propuesta del control de un sistema de cuatro masas. Por su parte, en (Szabat and Orłowska-Kowalska, 2009) se analiza el origen de las vibraciones torsionales tales como los cambios en la velocidad de la referencia, cambios en el par de la carga, fluctuaciones del par electromagnético, incorrecta alineación entre el motor eléctrico y la carga y el efecto de no linealidades del sistema.

Una de las principales restricciones para el diseño, radica en características inherentes a los sistemas mecánicos tales como la holgura y la fricción debido a la transmisión mediante ruedas dentadas o trenes de engranajes. En el caso de la holgura es una no linealidad capaz de producir ciclos límite tal y como se reporta en (Márton and Lantos, 2009). En la actualidad, la literatura recoge numerosos trabajos relacionados con el control de sistemas mecánicos en los que se considera la holgura en el diseño de una manera directa o indirecta como en (Márton and Lantos, 2009), (Peter et al., 2003), (Serkies and Szabat, 2013), (Scholing and Orlik, 2000) y (Thomsen and Fuchs, 2009).

Asimismo, es inevitable en todo mecanismo la existencia de la fricción entre sus partes. El fenómeno no lineal de la fricción es muy complejo ya que depende muchos factores y variables tales como: la temperatura, la lubricación en el eje del convertidor electromecánico, del mecanismo y de la transmisión, entre otros factores tal y como se analiza en (De Marchi, 1998), (Olsson et al., 1998) y (Li, 1999). En (Olsson et al., 1998) se puede encontrar un análisis detallado del fenómeno de la fricción y una descripción de los diferentes modelos que existen en la actualidad. En (Li, 1999) se emplea el modelo de dos masas con transmisión flexible y los autores realizan una revisión del fenómeno no lineal de la fricción, de sus modelos, del procedimiento de identificación y de las técnicas de compensación de la fricción. Entre las técnicas de control que se exponen de forma resumida en (Li, 1999) se encuentran: control robusto H ∞ , compensación adaptativa, control adaptativo por modelo de referencia, control por modo deslizante y control por aprendizaje.

Este trabajo explora uno de los diseños más clásicos, básicos y ampliamente utilizados por la industria para el control, en este caso el control en cascada. Además aprovechando el acervo en el campo del control inteligente y los métodos de transformación para obtener un sistema de control borroso equivalente se presenta un control en cascada borroso. El estudio presentado evalúa a partir de simulaciones el comportamiento del sistema de control en cascada lineal y borroso con resultados positivos en ambos casos.

2. Modelado del sistema electromecánico

En esta sección se presenta un modelo para el eje X de un sistema electromecánico multieje. Se asume que el modelo es válido para los tres ejes X-Y-Z, suponiendo accionamientos y partes mecánicas similares. El modelo consta de varias partes que serán descritas brevemente.

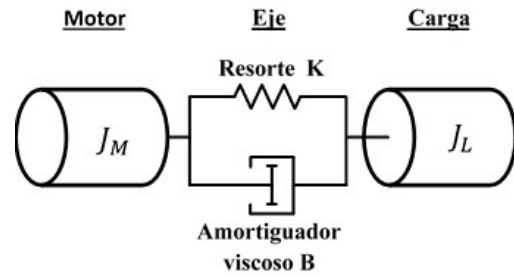


Figura 1. Esquema del modelo de dos masas con resorte y amortiguador viscoso.

El modelo mecánico consiste en un sistema de dos masas de tres elementos claramente diferenciados: el motor, el eje y la carga (ver figura 1). Los parámetros físicos de este modelo son: la rigidez del eje K , el amortiguamiento B , la inercia del motor J_M , la inercia de la carga J_L , el momento electromecánico aplicado por el motor M_M , el momento de la carga M_L , y el momento de torsión del eje M_S .

Se plantea el estudio del modelo mecánico mediante ecuaciones de estado. Se usarán como variables de estado las velocidades angulares de las masas del motor ω_M y carga ω_L y el momento de torsión del eje M_S (Del Toro et al., 2007).

Por una parte se tienen las ecuaciones de equilibrio, que si se combinan con las ecuaciones descriptivas de las mismas permiten obtener las ecuaciones (1-2)

$$J_M \frac{d}{dt} \omega_M = M_M - M_S \quad (1)$$

$$J_L \frac{d}{dt} \omega_L = M_S - M_L \quad (2)$$

La ecuación descriptiva para el eje teniendo en cuenta su rigidez y amortiguamiento se muestra en (3).

$$M_S = K(\theta_M - \theta_L) + B(\omega_M - \omega_L) \quad (3)$$

El modelo en variables de estado representado en forma matricial queda representado por (4)

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_M \\ \dot{\omega}_L \\ \dot{M}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{J_M} \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_L} \\ K & -K & -B\left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_L}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_M \\ \omega_L \\ M_S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_M} & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_L} \\ \frac{B}{J_M} & \frac{B}{J_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_M \\ M_L \end{bmatrix} \quad (4)$$

A partir de aquí se simplifica el sistema a una entrada haciendo nulo M_L ya que la carga es un elemento pasivo que solo se opone al par que le comunica el eje. Esto no es completamente cierto ya que la carga también se opone al

movimiento por medio de la fricción, pero esta fricción no es independiente como entrada sino que depende de la velocidad de la carga y se modelará a parte como un par perturbador que debilita la entrada M_M .

Partiendo de la ecuación (4) y aplicando (5, 6), se obtiene la ecuación (7), mediante la cual se podrán determinar las funciones de transferencia que permiten obtener las variables de estado ω_M , ω_L y M_S a partir de la entrada M_M .

Para el sistema genérico

$$\frac{d}{dt}[\bar{e}(t)] = [A_1][\bar{e}(t)] + [A_2][\bar{w}] \quad (5)$$

Su solución, con estado inicial cero para las variables de estado, en el dominio de Laplace es:

$$[\bar{e}(s)] = (s[I] - [A_1])^{-1} \cdot ([A_2][\bar{w}]) \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_M(s) \\ \omega_L(s) \\ M_S(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s & 0 & \frac{1}{J_M} \\ 0 & s & -\frac{1}{J_L} \\ -K & K & s + B\left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_L}\right) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{M_M}{J_M} \\ \frac{B M_M}{J_M} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Después de operar (7) queda:

$$\omega_M(s) = \frac{M_M}{J_M s} \cdot \frac{s^2 + \frac{B}{J_L}s + \frac{K}{J_L}}{s^2 + B\left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_L}\right)s + K\left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_L}\right)} \quad (8)$$

$$\omega_L(s) = \frac{M_M}{J_M J_L s} \cdot \frac{Bs + K}{s^2 + B\left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_L}\right)s + K\left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_L}\right)} \quad (9)$$

$$M_S(s) = \frac{M_M}{J_M} \cdot \frac{Bs + K}{s^2 + B\left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_L}\right)s + K\left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_L}\right)} \quad (10)$$

En primer lugar la función de transferencia entre M_M y ω_M queda:

$$H_{\omega_M/M_M}(s) = \frac{\omega_M(s)}{M_M(s)} = \frac{1}{J_M s} \cdot \frac{s^2 + \frac{B}{J_L}s + \frac{K}{J_L}}{s^2 + \frac{B}{J_L}\left(1 + \frac{J_L}{J_M}\right)s + \frac{K}{J_L}\left(1 + \frac{J_L}{J_M}\right)} \quad (11)$$

Si se define la frecuencia de resonancia ω_{01} y de antiresonancia ω_{02} como:

$$\omega_{01} = \sqrt{\frac{K}{J_L}} \quad \omega_{02} = \omega_{01} \sqrt{1 + \frac{J_L}{J_M}} \quad (12)$$

Y el coeficiente de amortiguamiento D_2 y D_1 como:

$$D_2 = \frac{B \omega_{02}}{2K} \quad D_1 = \frac{B}{2 \omega_{01} J_L} \quad (13)$$

Queda:

$$H_{\omega_M/M_M}(s) = \frac{1}{J_M s} \cdot \frac{s^2 + 2D_1 \omega_{01} s + \omega_{01}^2}{s^2 + 2D_2 \omega_{02} s + \omega_{02}^2} \quad (14)$$

Se puede también definir otra función de transferencia entre ω_M y ω_L .

$$H_{\omega_L/\omega_M}(s) = \frac{\omega_L(s)}{\omega_M(s)} = \frac{\frac{B}{J_L}s + \frac{K}{J_L}}{s^2 + \frac{B}{J_L}s + \frac{K}{J_L}} \quad (15)$$

Usando las mismas definiciones para ω_{02} , ω_{01} , D_2 y D_1 queda:

$$H_{\omega_L/\omega_M}(s) = \frac{2D_1 \omega_{01} s + \omega_{01}^2}{s^2 + 2D_1 \omega_{01} s + \omega_{01}^2} \quad (16)$$

Con estas expresiones se puede construir el modelo cuyas salidas sean las velocidades angulares del motor y de la planta.

Este es un modelo ampliamente conocido y que se usa por distintos autores como por ejemplo (De Marchi, 1998).

2.1. Modelo de fricción

Finalmente para obtener un modelo que sea lo más parecido a lo que se tiene en la realidad, se modelan la fricción, la holgura y el ruido. La fricción es un fenómeno inherente a todo sistema electromecánico y deteriora el desempeño de los mismos, esta ha sido estudiada ampliamente en la ingeniería mecánica clásica y últimamente ha tenido un fuerte resurgimiento; esto se debe entre otras cosas a grandes necesidades en la ingeniería en un amplio rango de aplicaciones que van desde los discos duros hasta los vehículos (Fontanet et al., 2016).

El modelo de fricción más básico es el modelo de Coulomb, donde la fuerza de fricción F es constante con un valor F_C y dependiente del sentido de la velocidad. Añadiendo una pequeña componente de fricción viscosa F_v que depende de la velocidad relativa entre las superficies v , el modelo clásico puede expresarse como se muestra en (17).

$$F = F_C \operatorname{sgn}(v) + F_v v \quad (17)$$

Para evitar la discontinuidad en el paso por $v=0$ destaca el modelo de Karnopp que considera un umbral de velocidades entorno al cero, bajo el cual la fuerza de fricción se supone linealmente proporcional a la velocidad. Según (Deur and Peric, 2000) se ha demostrado experimentalmente que si el umbral de velocidad se encuentra en un intervalo entre 10^{-4} y $10^{-6} m/s$, representa un buen compromiso entre la precisión, eficacia y solidez computacional del modelo.

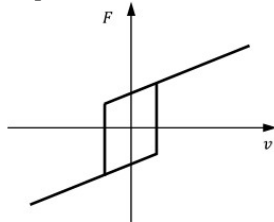


Figura 2. Representación del modelo de fricción usado en simulación.

2.2. Holguras

Como en el caso de la fricción, en esta investigación se utiliza un modelo que sea lo suficientemente realista a la par que eficiente. El conocimiento del comportamiento de las holguras es mucho importante que el de la fricción. Por un lado, se diferencia entre una parte de histeresis mecánica y, por otro lado, la parte asociada a la dinámica del impacto entre dos superficies duras que entran en contacto. El modelo clásico de holgura (figura 3) solo tiene en consideración la histeresis mecánica mediante una zona de banda muerta centrada en el punto de equilibrio desplazado.

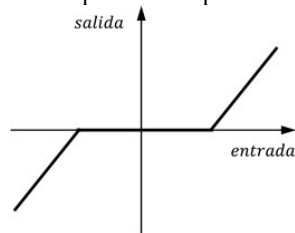


Figura 3. Representación del modelo clásico de holgura.

Este modelo ha sido usado ampliamente con resultados bastante buenos y realistas por lo que será el utilizado en el modelo en simulación.

2.3. Ruido

La influencia de las dinámicas no modeladas se representará mediante una perturbación en forma de ruido en la señal de la posición de la carga antes de ser utilizada en el sistema de control. En este trabajo se utiliza otro enfoque. Se hace un desarrollo en series Fourier de esta señal identificando los armónicos principales de las señales reales adquiridas en una máquina herramienta. Hay que tener en cuenta que este ruido se corresponde con una máquina herramienta con una frecuencia natural de 30 Hz.

Como resultado de este modelo del ruido, se disponen de 3 vectores que representan la amplitud, frecuencia y desfase de las componentes. Para equiparar la salida del modelo con los datos que se obtienen del sistema físico real, las variables de salida del modelo tienen que ser las posiciones del motor θ_M y de la carga θ_L . Estas se obtienen a partir de las velocidades ya calculadas, ver ecuaciones (18, 19):

$$\theta_M(t) = \theta_{M0} + \int_0^t \omega_M dt \quad (18)$$

$$\theta_L(t) = \theta_{L0} + \int_0^t \omega_L dt \quad (19)$$

Los parámetros del modelo aparecen resumidos en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros del modelo

Inercia del motor	$J_M = 11,0 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^2$
Inercia de la carga	$J_L = 9,8 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^2$
Frecuencia de resonancia	$f_1 = 30 \text{ Hz} \rightarrow \omega_{01} = 2 \pi f_1 \text{ rad / s}$
Coefficiente de amortiguamiento	$D_f = 0.1$
Constante par motor	$K_t = 1.3 \text{ Nm / A}$
Histeresis	$fH = 4.5 \text{ rpm}$
Fricción Coulomb	0.625 Nm
Fricción viscosa	0.007 Nm s
Constante de tiempo para el filtro	25.0 ms
Holgura	$5 \mu\text{m}$
Constante del husillo	$K_H = 0.010 / (2\pi) \text{ m / rad}$

3. Trayectoria y análisis

Se pretende realizar el diseño de un sistema de control de posición/trayectoria de dos ejes utilizado en el seguimiento de trayectorias. Un aspecto importante que no será tratado en este trabajo es la generación de trayectorias. En este trabajo se evaluará el comportamiento del error de seguimiento considerando una trayectoria circular de 200 milímetros de radio.

Las señales más importantes a considerar son el error de posición, el error de velocidad y la señal de control. En la primera se ve claramente si se ha conseguido un buen resultado en el seguimiento de la señal; en la segunda, se puede analizar el comportamiento del lazo de velocidad; y la tercera, proporciona información acerca de la exigencia que se le pide al motor. Se utilizarán cifras de mérito ampliamente utilizadas tales como el ITAE, el ITSE, el MAE y el IAE. De estas cifras de mérito podemos obtener información relevante de cómo está comportándose el sistema de control. También se pueden analizar estas cifras de mérito sobre las otras señales, por ejemplo, es de gran utilidad obtener la integral absoluta de la señal de control (IAU) y su máximo absoluto (MAU). La primera de ellas nos proporciona información relacionada con el esfuerzo de control. La segunda nos permite identificar los máximos que, obviamente, no deberían de sobrepasar ciertos límites.

4. Estrategias de control: control en cascada clásico y borroso.

En esta investigación se analiza una técnica de control muy conocida pero que tiene dos características importantes que hacen que siga siendo la más utilizada en la industria, tales como Siemens y Fagor Automation, a saber: permite desacoplar los lazos de control de posición y velocidad y tratar por separado la compensación de las no linealidades incorporando componentes anticipativas. Por otra parte, los procedimientos de ajuste son relativamente sencillos y de fácil aplicación por parte de la industria. La primera versión que se diseñará es un sistema de control en cascada P-PI clásico con ajuste óptimo basado en la técnica Nelder-Mead; y el segundo sistema es sistemas de control en cascada P-PI borroso en el que se utiliza también el método de Nelder-Mead de sintonía óptima.

4.1. Control en cascada P-PI

El control en cascada es una estructura de control muy consolidada a nivel industrial por sus muy buenos resultados y sencillez en el ajuste (Ogata and Yang, 1970).

Esta estructura responde de forma mucho más completa que los tradicionales controladores PID. Los controladores PID clásicos con un solo lazo también están muy extendidos en sistemas de control a nivel industrial pero en el caso del sector metal-mecánico predomina el uso de la estructura de control en cascada.

Este enfoque permite que los lazos interiores corrijan las perturbaciones interiores antes de que lleguen a afectar al lazo principal. Además, permite utilizar componentes anticipativas. Estas componentes anticipativas son un elemento clave en este sistema de control.

4.1.1. Ajuste óptimo

Para el ajuste del control propuesto se ha utilizado el método de Nelder-Mead, ya que, aunque las condiciones iniciales tienen una influencia, es bastante efectivo y rápido

para encontrar un óptimo local. Es un método libre de gradiente, lo cual resulta útil para optimizar funciones de coste que no están del todo definidas mediante una función explícita.

Para llevar a cabo la optimización se ha utilizado MatLab/Simulink. Los parámetros finales de los bloques de control P y PI son: ganancia proporcional para lazo externo $k_p = 13.9317 \text{ s}^{-1}$, ganancia proporcional para lazo interno $k_p = 6.4304 \text{ A/(rad}\cdot\text{s}^{-1})$ y el tiempo de integración para el lazo interno $T_i = 0.001 \text{ s}$.

4.1.2. Resultados obtenidos

En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante simulación; en estas se pueden analizar los efectos de la fricción, la holgura y el ruido, dicho esto, para mostrar una mayor semejanza a la realidad, se ha decidido simular con todas las no linealidades activas.

Los estudios realizados han considerado una variación en la frecuencia de resonancia, manteniendo constante el coeficiente de amortiguamiento, luego se mantendrá la frecuencia y se procede a realizar simulaciones con distintos valores del coeficiente de amortiguamiento, finalmente se varían ambos parámetros.

La Tabla 2 muestra las cifras de mérito obtenidas en las condiciones descritas previamente. Como puede observarse, a medida que disminuye la frecuencia de resonancia el comportamiento del sistema empeora.

Tabla 2: Comportamiento del sistema de control en cascada P-PI.

	12 Hz	13 Hz	20 Hz	30 Hz	40 Hz
ITAEX	1,921E-02	1,645E-02	8,199E-03	3,620E-03	3,152E-03
ITSEX	3,543E-03	2,912E-03	1,102E-03	3,837E-04	2,135E-01
MAEX	5,423E+03	5,650E+00	5,462E+00	5,269E+00	5,468E+03
IAUX	4,860E+04	4,727E+01	4,044E+01	3,497E+01	3,173E+04
ITAEY	5,023E+02	3,541E-01	5,396E-02	1,942E-02	1,717E+01
ITSEY	2,654E+03	5,545E+00	2,212E-01	2,860E-02	2,997E+01
MAEY	2,928E+04	5,778E+00	5,632E+00	5,528E+00	5,673E+00
IAUY	1,143E+03	1,098E+03	8,681E+05	6,820E+02	5,729E+02

Lo mismo ocurre al analizar ante distintos valores en el amortiguamiento manteniendo $f_i = 30 \text{ Hz}$. Al hacerla más baja el sistema se comporta peor llegando a ser inestable. Para valores más altos de dicha relación se mejoran las cifras de mérito, como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3: Cascada P-PI. Ajuste óptimo. Cifras de mérito ante distintos coeficientes de amortiguamiento

	D=0.04	D=0.05	D=0.1	D=0.2
ITAEX	5,040E-03	4,405E-03	3,620E-03	3,243E-03
ITSEX	1,156E-03	9,401E-04	3,837E-04	1,605E-04
MAEX	5,521E+00	5,374E+00	5,269E+00	5,208E+00
IAUX	5,475E+01	4,906E+01	3,497E+01	2,596E+01
ITAEY	7,270E-01	1,074E-01	1,942E-02	1,551E-02
ITSEY	1,793E+01	6,693E-02	2,860E-02	2,659E-02
MAEY	5,692E+01	5,508E+00	5,528E+00	5,506E+00
IAUY	1,351E+03	1,159E+03	6,820E+02	3,786E+02

A continuación se varía la frecuencia de resonancia $f_i = 21 \text{ Hz}$, y el coeficiente de amortiguamiento $D=0.06$, estas son condiciones más duras. La figura 4 muestra el error de posición para la planta con la variación de los parámetros antes mencionados, puede verse, que la misma continúa siendo estable, y el error de la posición se mantiene en rangos aceptables.

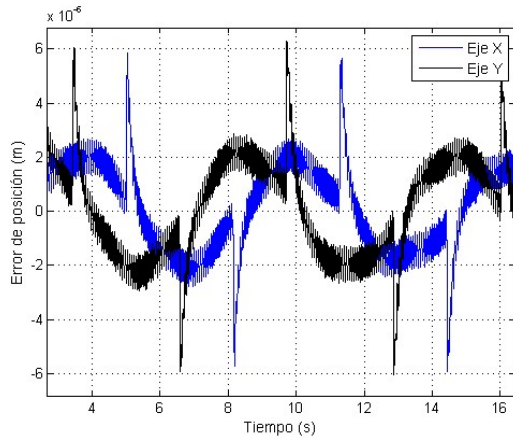


Figura 4. Cascada P-PI. Ajuste óptimo. Error de posición en los ejes X e Y, para $f_i = 21$ Hz y $D = 0.06$

4.2. Control en cascada borroso

El control borroso se ha convertido en una tecnología con un amplio impacto industrial que está presente en casi todas las facetas de la vida desde los electrodomésticos hasta los vehículos (Haber et al., 1996). Este trabajo pretende estudiar y analizar el alcance de los sistemas de control borroso en esquemas de control en cascada y en evaluar en qué medida la no linealidad en el control borroso mejora el comportamiento de sistema electromecánico en presencia de no linealidades duras como la holgura y la fricción.

Para realizar un control borroso equivalente de una acción P, I o D se toma como base el trabajo seminal (Matia et al., 1992). Uno de los enfoques a la hora de hacer un control borroso equivalente consiste en mantener la parte lineal conocida fuera del control borroso y utilizar el control borroso para introducir, posteriormente, no linealidades.

Controlador Borroso P a partir del control lineal P

El equivalente borroso P (FP) se obtiene escogiendo dos funciones de pertenencia en su forma más simple, en este trabajo se demuestra la forma de realizarlo escogiendo 3 funciones como las representadas por (20).

Se realizará la transformación de un bloque P con un rango con una K_p de 2.

$$\begin{aligned}
 N &\in \begin{bmatrix} -2|e_{\max}| & -|e_{\max}| & 0 \end{bmatrix} \\
 Z &\in \begin{bmatrix} -|e_{\max}| & 0 & |e_{\max}| \end{bmatrix} \\
 P &\in \begin{bmatrix} 0 & |e_{\max}| & 2|e_{\max}| \end{bmatrix} \\
 N &\in \begin{bmatrix} -1000 & -500 & 0 \end{bmatrix} \\
 \Rightarrow Z &\in \begin{bmatrix} -500 & 0 & 500 \end{bmatrix} \\
 P &\in \begin{bmatrix} 0 & 500 & 1000 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (20)$$

Definiendo las salidas u de tipo nítida por (21):

$$\begin{aligned}
 CN &= -|e_{\max}| \cdot K_p & CN &= -1000 \\
 CZ &= 0 & CZ &= 0 \\
 CP &= |e_{\max}| \cdot K_p & CP &= 1000
 \end{aligned} \quad (21)$$

Y las reglas (22):

$$\begin{aligned}
 \text{IF } e = N \quad \text{THEN } u &= CN \\
 \text{IF } e = Z \quad \text{THEN } u &= CZ \\
 \text{IF } e = P \quad \text{THEN } u &= CP
 \end{aligned} \quad (22)$$

De forma general se define el controlador borroso normalizado con una entrada y una salida de la siguiente manera:

- Las funciones de pertenencia deben ser triangulares solapadas en $\mu=0.5$ y se construirán de acuerdo a la siguiente expresión (23) en función de la cantidad de funciones de pertenencias deseada.

$$\begin{aligned}
 e_1 &\in \begin{bmatrix} -1-k & -1 & -1+k \end{bmatrix} \\
 e_2 &\in \begin{bmatrix} -1 & -1+k & -1+2k \end{bmatrix} \\
 \vdots &\vdots \begin{bmatrix} -1+k & \ddots & -1+3k \end{bmatrix} \\
 &\begin{bmatrix} \ddots & \ddots & \vdots \end{bmatrix} \\
 &\begin{bmatrix} \ddots & \ddots & 1-k \end{bmatrix} \\
 &\begin{bmatrix} \ddots & 1-k & 1 \end{bmatrix} \\
 e_n &\in \begin{bmatrix} 1-k & 1 & 1+k \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (23)$$

donde:

e_i := la i -ésima función de pertenencia de la entrada

n := cantidad total de funciones de pertenencia (mínimo 2)

$$k := \frac{2}{(n-1)}$$

- Las salidas (24) serán conjuntos de tipo nítido (*singleton*) y se corresponderán con el valor donde se produce el pico en cada función de pertenencia triangular, esto es, de -1 a 1 divididas en intervalos de longitud “ k ”:

$$\text{Salidas} = \{-1, -1+k, \dots, 1-k, 1\} \quad (24)$$

- Se usarán “ n ” reglas (25); una para cada una de las funciones de pertenencia de la entrada.

$$\begin{aligned}
 \text{IF } e = e_1 \quad \text{THEN } \text{salida} &= -1 \\
 \text{IF } e = e_2 \quad \text{THEN } \text{salida} &= -1+k \\
 &\vdots \\
 \text{IF } e = e_{n-1} \quad \text{THEN } \text{salida} &= 1-k \\
 \text{IF } e = e_n \quad \text{THEN } \text{salida} &= 1
 \end{aligned} \quad (25)$$

Controlador Fuzzy PI a partir del control PI

En este el equivalente al control PI consistirá en un control borroso con dos entradas y una sola salida. Se parte de la ecuación discretizada de la ley del regulador PI continuo.

En este caso las dos entradas del control borroso serán (26):

$$\begin{aligned}
 ep &= e \\
 ei &= T_s \frac{z}{z-1} e
 \end{aligned} \quad (26)$$

Funciones de pertenencia triangulares de la entrada (27):

$$\begin{aligned} N_p &\in [-2|ep_{max}| \quad -|ep_{max}| \quad 0] \\ Z_p &\in [-|ep_{max}| \quad 0 \quad |ep_{max}|] \\ P_p &\in [0 \quad |ep_{max}| \quad 2|ep_{max}|] \end{aligned} \quad (27)$$

Funciones de pertenencia triangulares de la entrada ei (28):

$$\begin{aligned} N_i &\in [-2|ei_{max}| \quad -|ei_{max}| \quad 0] \\ Z_i &\in [-|ei_{max}| \quad 0 \quad |ei_{max}|] \\ P_i &\in [0 \quad |ei_{max}| \quad 2|ei_{max}|] \end{aligned} \quad (28)$$

Salidas singleton (29):

$$\begin{aligned} CN_p &= -|ep_{max}| \cdot K_p & CN_i &= -|ei_{max}| \cdot K_p / T_i \\ CZ_p &= 0 & CZ_i &= 0 \\ CP_p &= |ep_{max}| \cdot K_p & CP_i &= |ei_{max}| \cdot K_p / T_i \end{aligned} \quad (29)$$

Donde es necesario definir no solo K_p y T_i sino también los rangos de cada entrada del bloque borroso, esto es, ep_{max} y ei_{max} .

Las reglas en este caso se representan en la Tabla 4 donde se recogen todas las combinaciones posibles entre las funciones de pertenencia de las dos entradas:

Tabla 4: Tabla de reglas para el F-PI con 3 funciones de pertenencia para cada entrada

	N_i	Z_i	P_i
N_p	$CN_p + CN_i$	$CN_p + CZ_i$	$CN_p + CP_i$
Z_p	$CZ_p + CN_i$	$CZ_p + CZ_i$	$CZ_p + CP_i$
P_p	$CP_p + CN_i$	$CP_p + CZ_i$	$CP_p + CP_i$

Generalizando lo antes expuesto, en este trabajo se presentan los resultados obtenidos escogiendo cinco reglas para el control borroso de posición, y 5^2 reglas para el de velocidad. Estas 25 últimas reglas se corresponden con todas las combinaciones posibles entre las distintas funciones de pertenencia de las dos entradas sin que haya solapamientos entre la parte proporcional y la parte integral.

4.2.1. Ajuste óptimo

Para ajustar los parámetros del controlador se aplicará el mismo algoritmo de optimización que el usado en el control en cascada no borroso, esto es, el algoritmo de Nelder-Mead.

Las hipótesis iniciales serán las mismas: fricción y holguras activadas, compensación de fricción activada, ruido y compensación de holgura desactivados. De este modo, se pretende comprobar si mejora el pico de inversión del control en cascada borroso frente al no borroso con los parámetros a optimizar decididos y partiendo de las mismas condiciones iniciales, la misma función objetivo y usando el método de Nelder-Mead como algoritmo de optimización. Para realizar las pruebas de análisis dinámico, se aplican las mismas variaciones a la frecuencia de resonancia y el coeficiente de amortiguamiento descritos en (4.1.2).

Tabla 5: Cascada FP-FPI. Ajuste óptimo. Cifras de mérito ante distinta frecuencia de resonancia

	12 Hz	13 Hz	20 Hz	30 Hz	40 Hz
ITAEX	3,827E-02	3,197E-02	1,600E-02	6,644E-03	4,981E-03
ITSEX	1,005E-02	7,324E-03	3,113E-03	1,375E-03	8,109E-04
MAEX	6,466E+00	6,690E+00	5,925E+00	6,019E+00	6,297E+00
IAUX	1,531E+01	1,531E+01	1,531E+01	1,530E+01	1,530E+01
ITAEY	1,593E-01	1,518E-01	6,577E-02	3,336E-02	1,511E-02
ITSEY	2,058E+00	2,463E+00	5,433E-01	1,365E-01	1,913E-02
MAEY	6,875E+00	6,701E+00	6,290E+00	6,162E+00	6,244E+00
IAUY	1,742E+01	1,741E+01	1,758E+01	1,767E+01	1,773E+01

La Tabla 6 muestra las cifras de mérito ante las condiciones descritas previamente.

Tabla 6: Cascada FP-FPI. Ajuste óptimo. Cifras de mérito ante distintos coeficientes de amortiguamiento

	D=0.04	D=0.05	D=0.1	D=0.2
ITAEX	8,116E-03	7,714E-03	6,644E-03	5,903E-03
ITSEX	3,355E+00	2,781E-03	1,375E-03	5,867E-04
MAEX	6,109E+00	6,061E+00	6,019E+00	5,960E+00
IAUX	1,529E+01	1,530E+01	1,530E+01	1,532E+01
ITAEY	4,392E-02	2,929E-02	3,336E-02	2,173E-02
ITSEY	6,764E-02	3,702E-02	1,365E-01	4,852E-02
MAEY	6,246E+00	6,215E+00	6,162E+00	6,095E+00
IAUY	1,755E+01	1,772E+01	1,767E+01	1,755E+01

5. Análisis de los resultados

Como puede observarse, comparando las cifras de mérito mostrada de manera resumida en tabla 7, las mejoras introducidas al introducir el control en cascada equivalente FP-FPI no son significativas, lo mismo se observa al realizar una comparación gráfica (figura 5) entre las estrategias de control. Se consigue mejorar ligeramente el error de seguimiento a pesar de no ser ese el objetivo de la optimización.

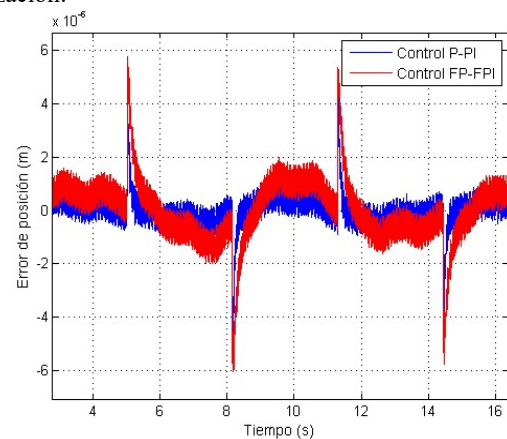


Figura 5. Cascada P-PI clásico frente a FP-FPI.

Tabla 7: Cascada P-PI Vs. FP-FPI. Ajuste óptimo. Cifras de mérito.

	P-PI	FP-FPI
ITAEX	3,620E-03	6,644E-03
ITSEX	3,837E-04	1,375E-03
MAEX	5,269E+00	6,019E+00
IAUX	3,497E+01	1,530E+01
ITAEY	1,942E-02	3,336E-02
ITSEY	2,860E-02	1,365E-01
MAEY	5,528E+00	6,162E+00
IAUY	6,820E+02	1,767E+01

6. Conclusiones

Tras realizar un modelado del sistema físico, se ha procedido a diseñar y evaluar el sistema de control en cascada P-PI y se ha diseñado a partir de éste un sistema de control en cascada borroso equivalente. Se ha aplicado un método de optimización (Nelder-Mead) para la sintonía óptima de los parámetros del controlador. El estudio comparativo de ambos controladores no muestra mejoras significativas en la aplicación del controlador borroso en cascada P'-PI. Estudios experimentales serán realizados en el futuro para evaluar el impacto real de ambas técnicas.

English Summary

Design of a classic and fuzzy cascade control system for trajectory control and tracking.

Abstract

New microfabrication processes impose new requirements for accuracy and robustness in position and trajectory control systems, opening up new lines of research in the field of modeling and control, and the need to evaluate intelligent control techniques such as Fuzzy control. In this paper, is presented the classical modeling of electrical and mechanical parts considered as a system of multiple masses coupled by an elastic transmission and damping, in the presence of friction and slack, two hard nonlinearities. Furthermore, the design of a controller is shown from a parametric model dependent resonance frequency and damping ratio. As the initial step of the study, a cascade control system is designed with anticipatory components that is the most used scheme in the industry. In order to evaluate the scope of nonlinearities in the control law, a cascade equivalent control is synthesized using the method proposed by Matia et al. 1992. To evaluate the behavior of the control system, uncertainties are considered in parameters such as the resonance frequency, the damping ratio and the width of the dead zone of the slack, and simulations were performed considering circular trajectories. Some merit numbers such as the integral of the absolute value of error in time (ITAE), the absolute maximum error (MAE) and the integral of the absolute value of the control signal (IAU) were used in the comparative study of both cascade controllers. The study allowed to verify that there are no significant differences in the behavior of both control systems (classic cascade and fuzzy cascade).

Keywords:

Microfabrication, friction, slack, cascade control, fuzzy control, merit numbers, optimization, Nelder-Mead.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco de los proyectos “Advanced Manufacturing 4th Generation (AM.4G)” financiado en el Programa CIEN y PCIN-2015-123 IoSENSE:

Línea Piloto Flexible de Sensores para el Internet de las Cosas”.

Referencias

- De Marchi, J.A., 1998. Modeling of dynamic friction, impact backlash and elastic compliance nonlinearities in machine tools, with applications to asymmetric viscous and kinetic friction identification, Rensselaer Polytechnic Institute.
- Del Toro, R.M., Schmittiel, M., Haber, R., Haber-Haber, R., 2007. System identification of the high performance drilling process for network-based control. Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, DETC2007 1 PART B, 827-834.
- Deur, J., Peric, N., 2000. Pointing and tracking position control system of electrical drives with elastic transmission, 9th International Conference and Exhibition on Power Electronics and Motion Control-EPE PEMC, Kosice, Slovak Republic, Citeseer.
- Fontanet, J.G.G., Cervantes, A.L., Ortiz, I.B., 2016. Alternativas de control para un Péndulo de Furuta. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI 13, 410-420.
- Haber, R., Alique, J.R., Alique, A., Ros, S., C.R. P., 1996. Fuzzy Supervisory Control of End Milling Process. Information Sciences 89, 95-106.
- Haber, R.E., Haber, R., Alique, A., Ros, S., 2002. Application of knowledge-based systems for supervision and control of machining processes. Handbook of software engineering and knowledge engineering 2, 673-710.
- Li, Y.-F., 1999. Motion Control Subject to Nonlinearities and Flexibility:(an Overview Based on Friction and Flexibility Compensation). KTH.
- Márton, L., Lantos, B., 2009. Control of mechanical systems with Stribeck friction and backlash. Syst Control Lett 58, 141-147.
- Matia, F., Jimenez, A., Galan, R., Sanz, R., 1992. Fuzzy controllers: Lifting the linear-nonlinear frontier. Fuzzy Sets and Systems 52, 113-128.
- Ogata, K., Yang, Y., 1970. Modern control engineering.
- Olsson, H., Åström, K.J., Canudas De Wit, C., Gäfvert, M., Lischinsky, P., 1998. Friction Models and Friction Compensation. European Journal of Control 4, 176-195.
- Peter, K., Schöling, I., Orlik, B., 2003. Robust output-feedback H_∞ control with a nonlinear observer for a two-mass system. IEEE Trans Ind Appl 39, 637-644.
- Sabatier, J., Poullain, S., Latteux, P., Oustaloup, A., Thomas, J.L., 2003. Robust speed control of a low damped four mass system based on crone control, 2003 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Chicago, IL, pp. 625-631.
- Schöling, I., Orlik, B., 2000. Control of a nonlinear two-mass system with uncertain parameters and unknown states, Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE, IEEE, pp. 1096-1103.
- Serkies, P.J., Szabat, K., 2013. Application of the MPC to the position control of the two-mass drive system. IEEE Trans Ind Electron 60, 3679-3688.
- Szabat, K., Orlowska-Kowalska, T., 2009. Adaptive control of the electrical drives with the elastic coupling using Kalman filter. INTECH Open Access Publisher.
- Thomsen, S., Fuchs, F.W., 2009. Speed control of torsional drive systems with backlash, 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE '09, Barcelona.
- Xi, X.-C., Poo, A.-N., Hong, G.-S., 2009. Improving contouring accuracy by tuning gains for a bi-axial CNC machine. International Journal of Machine Tools and Manufacture 49, 395-406.
- Xi, X.C., Poo, A.N., Hong, G.S., 2010. Tracking error-based static friction compensation for a bi-axial CNC machine. Precis Eng 34, 480-488.
- Yeh, S.S., Tsai, Z.H., Hsu, P.L., 2009. Applications of integrated motion controllers for precise CNC machines. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 44, 906-920.

ANÁLISIS FORMAL DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS NO LINEALES MEDIANTE REDES NEURONALES

Eloy Irigoyen, Mikel Larrea

DISA, EIB, UPV/EHU, Alda. Urquijo, S/N, 48013, Bilbao; {eloy.irigoyen; m.larrea}@ehu.eus

A.Javier Barragán, Miguel Ángel Martínez, José Manuel Andújar
DIESIA, Universidad de Huelva, Campus de La Rábida, 21819, Huelva;
{antonio.barragan; bohorquez; andujar}@diesia.uhu.es

Resumen

A la hora de estudiar un sistema (sistema industrial, biológico, económico, etc.), llegar a enfocar su análisis desde un punto de vista dinámico puede ser de gran utilidad e interés, en función de los requerimientos que condicionen dicho análisis. Mediante un análisis dinámico se puede conocer qué respuesta tendrá un sistema ante determinados estímulos de entrada, cuál es su comportamiento, si es estable en lazo abierto (local y globalmente), incluso si viene afectado por fenómenos no lineales, como bifurcaciones y ciclos límites, por ejemplo. En ocasiones donde el sistema es desconocido o su dinámica es lo suficientemente compleja como para formalizar su análisis dinámico a través de modelos matemáticos, las herramientas basadas en técnicas de Control Inteligente, como son las Redes Neuronales, cobran vital importancia ya que permiten abordar el problema a través de modelos del sistema. La literatura ha demostrado que los modelos neuronales son aproximadores universales tanto de una función como de su derivada, por lo que en base a datos de entrada/salida permiten modelar sistemas no lineales. Considerando que un modelo neuronal es un modelo matemático formalmente hablando, en base al mismo se pueden estudiar aspectos de la dinámica del sistema modelado real, del mismo modo a como se desarrolla en la teoría de control no lineal. Este trabajo presenta una metodología de estudio de los estados de equilibrio de un sistema no lineal, la linealización exacta de su modelo de estado neuronal y el estudio de la estabilidad local de los equilibrios a partir de dicha linealización. A partir de dicha información, es posible estudiar la estabilidad local de los estados de equilibrio, así como la dinámica del sistema en su entorno y la presencia de oscilaciones, obteniéndose una valiosa información del comportamiento dinámico del sistema.

Palabras clave: Análisis dinámico, estabilidad, estado de equilibrio, linealización, modelado neuronal, sistemas dinámicos, red neuronal MLP.

1. INTRODUCCIÓN

Mediante el análisis dinámico de un sistema se puede conocer su comportamiento y qué respuesta presentará ante diferentes variaciones en su entrada. El análisis formal de dicho sistema se convierte en tarea inalcanzable si no es posible determinar un modelo matemático, bien por ser un sistema desconocido, o parcialmente desconocido, bien porque su dinámica es lo suficientemente compleja [1]. Al no conocerse dicho modelo matemático se puede proceder generando un modelo en base a datos de entrada-salida, y con dicho modelo, realizar un estudio de la dinámica del sistema original.

Tradicionalmente, los métodos de ingeniería de control utilizados en muchas aplicaciones se han basado en enfoques lineales. Esto es debido a que los problemas han podido ser estudiados y resueltos en un ámbito local. Pero sin embargo, hoy en día muchos de dichos problemas se enfocan desde un punto de vista global, lo que lleva al uso de métodos no lineales.

Una de las razones principales que recomienda la utilización de los modelos no lineales es que los modelos lineales no tienen una dinámica suficientemente rica como para presentar una serie de fenómenos que se dan comúnmente en la vida real [2, 3, 4]. El comportamiento dinámico de los sistemas lineales, sin tener en cuenta su orden, está gobernado fundamentalmente por los autovalores de su matriz de estado. Por el contrario, los sistemas no lineales muestran un comportamiento mucho más rico, pudiendo producirse oscilaciones autoexcitadas, conocidas como ciclos límite, un comportamiento aperiódico y críticamente sensible a las condiciones iniciales [5], el caos [6], así como otros fenómenos dinámicos exclusivos de los sistemas no lineales, como la existencia de múltiples estados de equilibrio y bifurcaciones [7], entre otros.

Para el análisis de un sistema no lineal, su representación mediante un modelo matemático, generalmente mediante un modelo de estado, es el planteamiento inicial idóneo. Esto es posible si se dispone de suficiente conocimiento del sistema como para generar sus ecuaciones de estado, siempre y cuando su dinámica no sea excesivamente com-

pleja. Pero la realidad es que en múltiples ocasiones el sistema objeto de estudio puede ser demasiado complejo, ya sea por su dinámica o por su dimensión, o simplemente porque se desconocen las ecuaciones que gobiernan su funcionamiento. Las técnicas procedentes del área del Control Inteligente pueden ayudar a mejorar estos estudios, como es el caso de la Lógica Difusa [8, 9]. De igual modo, en estas situaciones las redes neuronales (RN) son una poderosa herramienta ya que permite modelar sistemas altamente no lineales a partir de datos de entrada-salida. Esta modelización puede ser cualitativa [10, 11, 12, 4] o estrictamente analítica, aprovechando el hecho de que las RN son aproximadores universales tanto de la función [13, 14, 15] como de su derivada [16, 17]. De este modo, aunque el sistema sea desconocido, es posible obtener un modelo neuronal del mismo. Formalmente hablando, un modelo neuronal es un modelo matemático. Por lo tanto, a partir de este modelo es posible estudiar aspectos de la dinámica del sistema real siempre que su precisión sea suficientemente alta. Esta forma de abordar el problema permite enfrentarse a sistemas no lineales, cuya modelización por técnicas matemáticas tradicionales puede resultar realmente difícil.

A la hora de analizar o diseñar una solución de control, el conocimiento de los estados de equilibrio que posee un sistema, así como la estabilidad de dichos estados, son aspectos que resultan de máximo interés. En el caso en el que el sistema es completamente desconocido, esta información puede ayudar a aclarar el funcionamiento del mismo, así como facilitar el diseño de un control adecuado. Es de destacar que, si bien existen trabajos previos que presentan una novedosa metodología de análisis basada en lógica difusa [9, 8], no se ha encontrado ningún trabajo que lo haga desde el punto de vista de las RN.

Este trabajo presenta una metodología para analizar un sistema no lineal bajo un enfoque generalista, el cual es inicialmente desconocido, a partir de un modelo neuronal. En el apartado 2 se introduce la formulación del problema y se ofrecen las ecuaciones que se utilizarán para la representación del modelo del sistema. En el apartado 3 se presenta la linealización exacta de un modelo neuronal general. A continuación, en el apartado 4 se plantea una propuesta de procedimiento para el análisis dinámico del sistema. Finalmente se aplica dicho procedimiento a dos ejemplos y se presentan las correspondientes conclusiones.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Sea n el orden del sistema y m su número de entradas, un modelo neuronal MLP equivalente de un sistema continuo, que estima tanto sus variables de estado, como salida, puede venir representado por [18, 19, 20, 21]:

$$\begin{aligned}\hat{x}(t+1|\theta) &= g[\varphi(t, \theta), \theta] \\ \hat{y}(t|\theta) &= C(\theta)\hat{x}(t|\theta)\end{aligned}\quad (1)$$

$$\text{siendo } \varphi(t, \theta) = \begin{bmatrix} \hat{x}(t|\theta) \\ u(t) \end{bmatrix},$$

donde $\varphi(t, \theta)$ es el vector de regresión, $u(t)$ las entradas al sistema y θ el vector de parámetros (ω, W) de la RN, los pesos y bias de sus capas.

De esta forma, la salida de una RN con una capa oculta y funciones de activación sigmoideal, junto a una capa de salida lineal, puede calcularse a través de la expresión siguiente, que representa el modelo neuronal de estado del sistema [20]:

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= f_i(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \equiv \hat{x}(t+1|\theta) = \\ &= \sum_{j=1}^{n_h} W_{i,j} F_j \left[\sum_{l=1}^{n+m} \omega_{j,l} \varphi_l(t) + \omega_{j,0} \right] + W_{i,0},\end{aligned}\quad (2)$$

donde $W_{i,j}$ son los pesos y bias de la capa de salida, ω_j son los pesos y bias de la capa oculta, n_h el número de neuronas de la capa oculta, $\varphi_l(t)$ es el vector de entrada a la RN en cada instante t y $n+m$ su dimensión. Considerando $neta$ el resultado de la combinación de entradas y pesos a cada neurona y que F_j es la función de activación de las neuronas de la capa oculta, se tiene:

$$neta = \sum_{l=1}^{n+m} \omega_{j,l} \varphi_l(t) + \omega_{j,0} \quad (3)$$

$$F_j(neta) = \frac{e^{neta} - e^{-neta}}{e^{neta} + e^{-neta}}, \quad (4)$$

donde F_j representa la función tangente hiperbólica.

3. LINEALIZACIÓN DE UN MODELO NEURONAL DE ESTADO

La linealización es una de las técnicas más utilizadas en el diseño de sistemas de control no lineales. Aunque es una técnica que no se debe emplear en muchos casos, ya que se desprecian los efectos de las no linealidades de los sistemas controlados, sí

que puede ser válida para controlar sistemas no muy complejos, o cuya dinámica se conozca de forma aproximada en regiones donde su comportamiento se acerque mucho a uno lineal.

Aparte de ser utilizada como método de control, la linealización puede emplearse para obtener información de un sistema no lineal. Se puede considerar que, con algunas salvedades, el comportamiento de un sistema no lineal en torno a un estado de equilibrio es muy similar al del sistema linealizado en torno a dicho estado [22, 7, 23]; por lo tanto, la obtención del sistema lineal equivalente de un modelo neuronal no lineal puede ser una herramienta muy útil para obtener información del sistema original.

Sea el modelo de estado genérico de un sistema no lineal dado por:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)), \quad (5)$$

el desarrollo en serie de Taylor hasta orden 1 de dicho sistema en torno a un punto $(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, determina que este se puede aproximar por:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) \approx \mathbf{A}_0 + \mathbf{A}\bar{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}\bar{\mathbf{u}}(t) \quad (6)$$

siendo $\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0$ y $\bar{\mathbf{u}} = \mathbf{u} - \mathbf{u}_0$, y donde las matrices del sistema lineal se calculan mediante las expresiones (7), (8) y (9).

$$\mathbf{A}_0 = \mathbf{f}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) \quad (7)$$

Si el punto $(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ es un estado de equilibrio del sistema, la matriz \mathbf{A}_0 será nula, ya que por definición un estado de equilibrio hace nula la ecuación de estado.

$$\mathbf{A} = \left(\begin{array}{ccc} \frac{\partial f_1(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_n(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial x_n} \end{array} \right) \bigg|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)} \quad (8)$$

$$\mathbf{B} = \left(\begin{array}{ccc} \frac{\partial f_1(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial f_1(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial u_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial f_n(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial u_m} \end{array} \right) \bigg|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)} \quad (9)$$

Si el sistema (5) se representa mediante un modelo neuronal, su equivalente matemático viene dado por (2). Si se linealiza esta expresión en torno al punto $(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$, se puede representar el modelo matemático equivalente de un sistema neuronal linealizado (10), donde \bar{x}_q y \bar{u}_v son las componentes de los vectores $\bar{\mathbf{x}}_0$ y $\bar{\mathbf{u}}_0$, respectivamente, los cuales a su vez componen el conjunto de entradas $(n + m)$ a la RN. Operando con la expresión anterior se obtiene (11), que desarrollando se puede expresar como (12).

$$\dot{x}_i \approx f_i(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) + \sum_{q=1}^n \frac{\partial f_i}{\partial x_q} \bigg|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)} \bar{x}_q + \sum_{v=n+1}^{n+m} \frac{\partial f_i}{\partial u_v} \bigg|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)} \bar{u}_v, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_i \approx f_i(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) &+ \sum_{q=1}^n \left[\frac{\partial}{\partial x_q} \left(\sum_{j=1}^{n_h} W_{i,j} F_j \left[\sum_{l=1}^n \omega_{j,l} \varphi_l(t) + \omega_{j,0} \right] + W_{i,0} \right) \right] \bigg|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)} \bar{x}_q \\ &+ \sum_{v=n+1}^{n+m} \left[\frac{\partial}{\partial u_v} \left(\sum_{j=1}^{n_h} W_{i,j} F_j \left[\sum_{l=n+1}^{n+m} \omega_{j,l} \varphi_l(t) + \omega_{j,0} \right] + W_{i,0} \right) \right] \bigg|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)} \bar{u}_v, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_i \approx f_i(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) &+ \sum_{q=1}^n \left[\frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{n_h} W_{i,j} F_j \left[\sum_{l=1}^n \omega_{j,l} \varphi_l(t) + \omega_{j,0} \right] \right)}{\partial x_q} \right] \bigg|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)} \bar{x}_q \\ &+ \sum_{v=n+1}^{n+m} \left[\frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{n_h} W_{i,j} F_j \left[\sum_{l=n+1}^{n+m} \omega_{j,l} \varphi_l(t) + \omega_{j,0} \right] \right)}{\partial u_v} \right] \bigg|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)} \bar{u}_v. \end{aligned} \quad (12)$$

A continuación, en base a los desarrollos de Pirabakaran y Becerra [10] y su extensión general a problemas de identificación de Larrea [24], junto a la función de activación $F_j(neta)$ de la RN descrita en la ecuación (4), se resolverán independientemente cada una de las derivadas parciales anteriores. En primer lugar, la primera derivada de (12) queda representada por:

$$\frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{n_h} W_{i,j} F_j \left[\sum_{l=1}^n \omega_{j,l} \varphi_l(t) + \omega_{j,0} \right] \right)}{\partial x_q} = \sum_{j=1}^{n_h} W_j o_j (1 - o_j) \omega_{j,q} \quad (13)$$

donde o_j es la salida de la neurona j de la capa oculta y q toma valores enteros en el intervalo $[1, n]$.

Para el cálculo de la segunda derivada se procede del mismo modo, obteniéndose la siguiente expresión:

$$\frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{n_h} W_{i,j} F_j \left[\sum_{l=n+1}^{n+m} \omega_{j,l} \varphi_l(t) + \omega_{j,0} \right] \right)}{\partial u_v} = \sum_{j=1}^{n_h} W_j o_j (1 - o_j) \omega_{j,v} \quad (14)$$

donde v toma valores enteros en el intervalo $[n+1, n+m]$.

Sustituyendo las expresiones (13) y (14) en (12), el modelo matemático equivalente de un sistema neuronal linealizado en torno a un punto $(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ viene dado por la siguiente expresión:

$$\dot{x}_i \approx f_i(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) + \sum_{q=1}^n \left[\sum_{j=1}^{n_h} W_j o_j (1 - o_j) \omega_{j,q} \right] \bar{x}_q + \sum_{v=n+1}^{n+m} \left[\sum_{j=1}^{n_h} W_j o_j (1 - o_j) \omega_{j,v} \right] \bar{u}_v. \quad (15)$$

4. ESTADOS DE EQUILIBRIO Y ESTABILIDAD LOCAL

Para el procedimiento de análisis, el primer paso a dar va enfocado en la obtención de un modelo neuronal de estado del sistema a analizar, como el dado por (1), mediante alguna de las muchas técnicas de modelado existentes [20], ya sea en línea [25, 26], o fuera de línea [4, 27]. Seguidamente es importante la localización de los estados de

equilibrio del sistema. La búsqueda de los estados de equilibrio de un sistema de control es uno de los primeros problemas que se deben resolver para proceder con el estudio de su dinámica. Como análisis previo al diseño del sistema de control, la obtención de los estados de equilibrio proporciona una valiosa información sobre el comportamiento de este, especialmente si se trata de un sistema no lineal, ya que estos puntos son candidatos ideales para el estudio de estos sistemas mediante técnicas de linealización. Una vez diseñado el controlador, la obtención de los estados de equilibrio del sistema realimentado puede ser útil para comprobar que el diseño se ha realizado adecuadamente, así como para poder aplicar análisis de estabilidad a dichos estados.

Para el caso de los sistemas neuronales, y dada la inherente capacidad de este tipo de modelos para representar dinámicas no lineales, se hace necesaria la utilización de métodos numéricos capaces de resolver el sistema de ecuaciones no lineales que se plantea:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{n_h} W_{1,j} F_j(neta_j) + W_{1,0} &= 0 \\ \sum_{j=1}^{n_h} W_{2,j} F_j(neta_j) + W_{2,0} &= 0 \\ &\vdots \\ \sum_{j=1}^{n_h} W_{n+m,j} F_j(neta_j) + W_{n+m,0} &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

En el análisis de los sistemas dinámicos no lineales, el cálculo de los estados de equilibrio del sistema puede convertirse en un problema de envergadura. A diferencia de los sistemas lineales que tienen uno o infinitos estados de equilibrio, un sistema no lineal puede tener uno, ninguno, cualquier número finito o infinitos estados de equilibrio. En este trabajo se propone emplear métodos numéricos para resolver el sistema de ecuaciones no lineales dado en (16), concretamente el método de Levenberg-Marquardt [28], extendido en el trabajo de Moré [29]. Este algoritmo requiere de un punto inicial para comenzar la búsqueda. Con objeto de maximizar las posibilidades de encontrar todos los estados de equilibrio existentes, se procede a inicializar el algoritmo mediante un barrido de puntos a lo largo de todo el universo de discurso, tanto de las variables de estado, como de las variables de entrada del sistema. Existen otras alternativas tanto dentro del ámbito de los algoritmos numéricos como en el de los bioinspirados para poder realizar esta búsqueda, pero los autores se han decantado por el algoritmo de Levenberg-Marquardt por ofrecer una rápida convergencia y precisión en los resultados [30, 31]. Este algoritmo inicializado en una malla de puntos es capaz de encontrar los

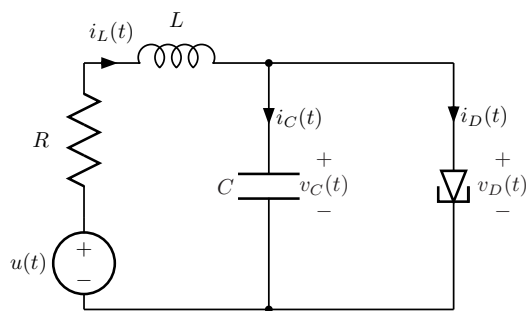


Figura 1: Circuito diodo túnel.

múltiples estados de equilibrio que pueden presentarse en un sistema no lineal con mayor rapidez que los algoritmos genéticos.

El funcionamiento del algoritmo de Levenberg-Marquardt requiere del uso de la matriz Jacobiana del sistema, la cual puede aproximarse o calcularse de forma explícita para mejorar la convergencia. El cálculo de la matriz Jacobiana de un modelo neuronal se ha resuelto de forma general en la sección anterior, por lo que puede incluirse en el algoritmo numérico para mejorar su precisión y velocidad de convergencia.

La misma matriz Jacobiana empleada para la resolución de los estados de equilibrio puede emplearse para linealizar el sistema en cada una de las soluciones obtenidas. De esta forma también es posible estudiar las características de los estados de equilibrio encontrados a partir de los autovalores de la matriz dinámica del sistema linealizado. Este análisis puede ayudar a comprender la dinámica del sistema, su estabilidad local, y a los ojos de un experto, incluso se pueden observar comportamientos más complejos como bifurcaciones o ciclos límite.

5. EJEMPLO

En esta sección se presenta un ejemplo de análisis a partir de su modelo neuronal, para un sistema no lineal que inicialmente se considerará desconocido. El sistema elegido es un caso de estudio ampliamente utilizado en estudios y análisis de sistemas no lineales [9, 8]

Sea el circuito diodo-túnel mostrado en la figura 1, donde $R = 1,5 \text{ k}\Omega$, $C = 2 \text{ pF}$ y $L = 5 \text{ }\mu\text{H}$, $x_1(t) = v_C(t)$, $x_2(t) = i_L(t)$ son las variables de estado del sistema, y $h(v)$ la característica $v_D - i_D$ no lineal del diodo-túnel mostrada en la figura 2 [32].

Suponiendo desconocida la dinámica del sistema, el procedimiento a seguir es obtener un modelo neuronal del sistema a partir de datos de entrada-

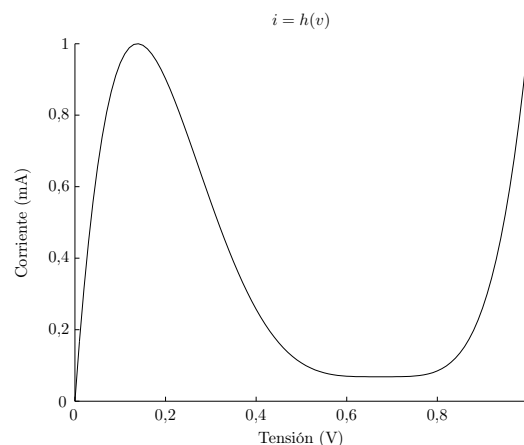


Figura 2: Característica V-I del diodo túnel.

salida, y analizar a continuación dicho modelo con objeto de extraer conclusiones sobre la dinámica del sistema.

Para modelar el sistema se ha empleado un conjunto de 3000 datos distribuidos uniformemente en el universo de discurso $x_1(t) \in [0, 1]$, $x_2(t) \in [0, 2]$ y $u(t) \in [0, 2]$. Realizando el ajuste de los parámetros de la red neuronal MLP, de estructura 3-3-1, mediante un procedimiento de aprendizaje basado en el algoritmo de entrenamiento de segundo orden de Levenberg-Marquardt [28, 33] se han obtenido unos errores cuadráticos medios (MSE) durante la validación con otro conjunto de datos de $0,1147 \text{ V/ns}$ y $3,03 \times 10^{-5} \text{ mA/ns}$, respectivamente.

A continuación se ha empleado el algoritmo de minimización de Levenberg-Marquardt [28, 29] para buscar las soluciones al sistemas de ecuaciones planteado en (16). Para ello se ha partido de una malla de puntos iniciales cuyos límites coinciden con el universo de discurso de cada una de las variables del sistema, empleando un incremento de 0,05 en todas ellas. En la figura 3 se muestran las soluciones del sistema real junto con las soluciones obtenidas por el algoritmo numérico sobre el modelo neuronal, descartando aquellas que se sitúan fuera del universo de discurso por carecer de validez.

Empleando la linealización exacta desarrollada en este artículo se han obtenido los modelos linealizados en cada uno de los estados de equilibrio mostrados en la figura, y se han caracterizado según su comportamiento (según los tipos de autovalores de la matriz dinámica del sistema linealizado). Como se puede apreciar en la figura, los estados de equilibrios del sistema real han sido hallados con bastante exactitud, incluso su tipo se corresponde con el obtenido a partir del modelo neuronal. Cabe mencionar que el algoritmo numérico ha localizado

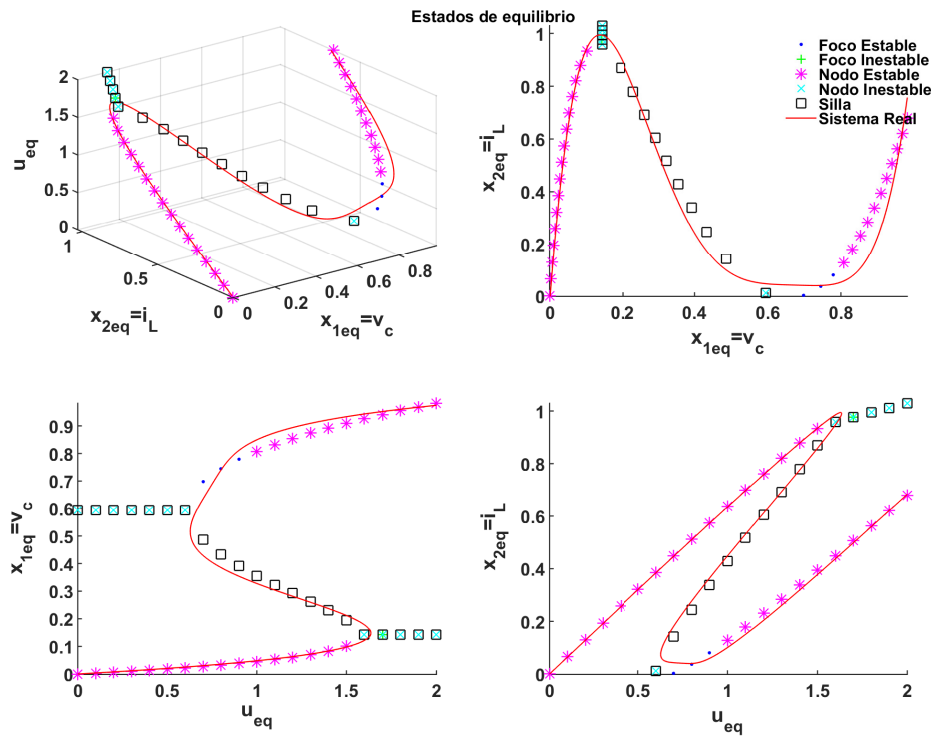


Figura 3: Estados de equilibrio localizados dentro del universo de discurso del modelo neuronal.

una serie de estados de equilibrio en el modelo neuronal que no existen en el sistema real. Este error puede deberse al propio error inherente de modelado o al algoritmo de minimización. Al menos en este caso, estos estados son fácilmente descartables porque, a diferencia del resto, no presentan un tipo de equilibrio coherente entre sí, coincidiendo prácticamente en un mismo punto distintos tipos de estados de equilibrio.

6. CONCLUSIONES

En este artículo se ha planteado el análisis dinámico de un sistema desconocido a través de la obtención de un modelo neuronal, basado en una sencilla estructura MLP, a partir de datos de entrada-salida del mismo. Se ha demostrado a través de un ejemplo ampliamente utilizado cómo se puede extraer información muy valiosa únicamente a partir del análisis del modelo neuronal, como la localización de los estados de equilibrio de un sistema y el estudio de su estabilidad local, así como la presencia y estabilidad de oscilaciones en el sistema.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la Viceconsejería de Universidades e Investigación, del Departamento de Educación, Política Lingüística y Cultura del Gobierno Vasco, por la ayuda del Programa de Movilidad del Personal Investigador concedida

al Dr.D. Eloy Irigoyen, con número de expediente *MV_2017_1_0032*, la cual ha dado lugar al desarrollo del presente trabajo. También desean agradecer a la Secretaría de Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación del Ministerio de Economía y Competitividad por la financiación asignada a la Red de Excelencia, con referencia DPI2015-71320-REDT.

Referencias

- [1] S. Chen and S. A. Billings. Neural networks for nonlinear dynamic system modelling and identification. *International Journal of Control*, 56(2):319–346, 1992.
- [2] H. J. Marquez. *Nonlinear control systems. Analysis and design*. John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [3] José Manuel Andújar and José Manuel Bravo. Multivariable fuzzy control applied to the physical-chemical treatment facility of a cellulose factory. *Fuzzy Sets and Systems*, 150(3):475–492, March 2005.
- [4] E. Irigoyen and G. Miñano. A narx neural network model for enhancing cardiovascular rehabilitation therapies. *Neurocomputing*, 109:9 – 15, 2013. New trends on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications.

- [5] H. K. Khalil. *Nonlinear systems*. Prentice-Hall, NJ, 2000.
- [6] Stephen Wiggins. *Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos*. Texts in Applied Mathematics. Springer, 2nd edition, October 2003.
- [7] S. Sastry. *Nonlinear system: analysis, stability, and control*. Springer, New York, 1999.
- [8] A.J. Barragán, B.M. Al-Hadithi, A. Jiménez, and J.M. Andújar. A general methodology for online TS fuzzy modeling by the extended kalman filter. *Applied Soft Computing*, 18(0):277–289, May 2014.
- [9] A.J. Barragán, B.M. Al-Hadithi, J.M. Andújar, and A. Jiménez. Metodología formal de análisis del comportamiento dinámico de sistemas no lineales mediante lógica borrosa. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 12(4):434 – 445, 2015.
- [10] K. Pirabakaran and V.M. Becerra. Pid auto-tuning using neural networks and model reference adaptive control. *IFAC Proceedings Volumes*, 35(1):451 – 456, 2002. 15th IFAC World Congress.
- [11] Nand Kishor, R. P. Saini, and S. P. Singh. Small hydro power plant identification using nnarx structure. *Neural Computing & Applications*, 14(3):212–222, Sep 2005.
- [12] R.K. Al Seyab and Y. Cao. Nonlinear system identification for predictive control using continuous time recurrent neural networks and automatic differentiation. *Journal of Process Control*, 18(6):568 – 581, 2008.
- [13] G. Cybenko. Approximation by superpositions of a sigmoidal function. *Mathematics of Control, Signals and Systems*, 2(4):303–314, Dec 1989.
- [14] Kurt Hornik, Maxwell Stinchcombe, and Halbert White. Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Networks*, 2(5):359 – 366, 1989.
- [15] Ken-Ichi Funahashi. On the approximate realization of continuous mappings by neural networks. *Neural Networks*, 2(3):183 – 192, 1989.
- [16] Kurt Hornik, Maxwell Stinchcombe, and Halbert White. Universal approximation of an unknown mapping and its derivatives using multilayer feedforward networks. *Neural Networks*, 3(5):551 – 560, 1990.
- [17] A. Ronald Gallant and Halbert White. On learning the derivatives of an unknown mapping with multilayer feedforward networks. *Neural Networks*, 5(1):129 – 138, 1992.
- [18] K. S. Narendra and K. Parthasarathy. Identification and control of dynamical systems using neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1(1):4–27, Mar 1990.
- [19] S. Jagannathan F.L. Lewis and A. Yesildirek. *Neural Network Control of Robot Manipulators and Nonlinear Systems*. Taylor & Francis, 1999.
- [20] N.K. Poulsen M. Nørgaard, O. Ravn and L.K. Hansen. *Neural Networks for Modelling and Control of Dynamic Systems: A Practitioner's Handbook*. Springer, 2000.
- [21] S. Jagannathan. *Neural Network Control of Nonlinear Discrete-time Systems*. Francis & Taylor, 2006.
- [22] Henk Nijmeijer and Arjan van der Schaft. *Nonlinear dynamical control systems*. Springer Verlag, Berlin, 1990.
- [23] Jean-Jacques E. Slotine and Weiping Li. *Applied nonlinear control*. Prentice-Hall, NJ, 1991.
- [24] Mikel Larrea. *Estrategia Adaptativa-Predictiva Basada en Redes Neuronales para el Control de Sistemas No Lineales*. phdthesis, (UPV/EHU), December 2014. ISBN-10: 1512179191 ISBN-13: 978-1512179194 Editor: CreateSpace Independent Publishing Platform.
- [25] Qing Song, Yilei Wu, and Yeng Chai Soh. Robust adaptive gradient-descent training algorithm for recurrent neural networks in discrete time domain. *Neural Networks, IEEE Transactions on*, 19(11):1841–1853, Nov. 2008.
- [26] T. Dierks and S. Jagannathan. Output feedback control of a quadrotor uav using neural networks. *Neural Networks, IEEE Transactions on*, 21(1):50–66, 2010.
- [27] Asier Zubizarreta, Mikel Larrea, Eloy Irigoyen, Itziar Cabanes, and Eva Portillo. Real time direct kinematic problem computation of the 3prs robot using neural networks. *Neurocomputing*, pages–, 2017.
- [28] K. Levenberg. A method for the solution of certain problems in least squares. In *Quart. Appl. Math.*, volume 2, pages 164–168, 1944.

- [29] Jorge J. Moré. The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory. In G.A. Watson, editor, *Numerical Analysis*, pages 105–116. Springer Verlag, Berlin, 1977.
- [30] Zsolt Ugray, Leon Lasdon, John Plummer, Fred Glover, James Kelly, and Rafael Martí. Scatter search and local nlp solvers: A multistart framework for global optimization. *INFORMS Journal on Computing*, 19(3):328–340, 2007.
- [31] Fred Glover. *A template for scatter search and path relinking*, pages 1–51. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1998.
- [32] Leon O. Chua, Charles A. Desoer, and Ernest S. Kuh. *Linear and nonlinear circuits*. McGraw-Hill series in electrical and computer engineering: Circuits and systems. McGraw-Hill Book Company, New York, 1987.
- [33] M. T. Hagan and M. B. Menhaj. Training feedforward networks with the marquardt algorithm. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 5(6):989–993, Nov 1994.

Predicción de la energía renovable proveniente del oleaje en las islas de Fuerteventura y Lanzarote

G.N. Marichal
nicomar@ull.edu.es;

D. Avila
davidapr@ull.es

A. Hernández
ahernand@ull.edu.es

I. Padrón
ipadron@ull.es

J. A. Rodríguez
jandas@ull.edu.es.

Escuela Politécnica Superior de Ingeniería. Sección de Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval,
Universidad de La Laguna.C/ Avda. Francisco Larroche s/n. 38071.Santa Cruz de Tenerife, España.

Resumen.

En el siguiente trabajo de investigación se realiza una caracterización de los potenciales del oleaje en las islas de Fuerteventura y Lanzarote, llevando a cabo una modelización de los mismos. Para alcanzar dicho objetivo se utilizan las series temporales del oleaje para aguas profundas facilitadas por “Puertos del Estado” (1996- 2016). El estudio establece un mapa de recursos undimotrices a partir de la información disponible, determinando zonas de interés que posteriormente podrán ser analizadas con mayor precisión. Se presenta un sistema Neuro-Fuzzy Genético con el objetivo de predecir los valores energéticos undimotrices de ciertos puntos, a partir de los valores conocidos de los puntos WANA cercanos.

Palabras Clave: Predicción, energía renovable, undimotriz, Lanzarote, Fuerteventura, Inteligencia Artificial.

1. Introducción.

En las islas Canarias, la promoción de las energías renovables se plantea como una de las claves de la política energética regional dirigida a la reducción de la dependencia energética de los combustibles fósiles importados y reducción de sus emisiones. Es por lo que desde hace varias décadas se viene trabajando en

varios centros de investigación y proyectos pilotos existentes en el archipiélago. Todo este esfuerzo ha traído consigo que al día de hoy Canarias sea un referente a nivel mundial en la implementación de las energías limpias, sin embargo las mismas están prácticamente circunscritas a la energía eólica onshore y solar fotovoltaica.

Aunque en España, como en el resto del mundo, aún no se aprovecha la energía de las olas de forma comercial, existiendo solo algunos proyectos a escala experimental. El desarrollo de tecnología nacional para diferentes prototipos, y proyectos de desarrollo de varios centros de pruebas permite pensar en un importante desarrollo industrial en el área de energías marinas en un futuro, pudiendo llegar a situar a España entre los principales productores de undimotriz a escala mundial.

Es por lo que se hace necesario el estudio de las energías provenientes del mar en el territorio español, tal es el caso del archipiélago canario el cual presenta un escenario ideal para el desarrollo del sector de las energías renovables marinas, especialmente las provenientes de las olas (*undimotriz*), tanto por su elevado potencial energético, como, por la especial situación geográfica de las islas, que con sus redes eléctricas aisladas y una dependencia casi total de los combustibles fósiles, hacen necesaria la introducción de nuevas fuentes de energías renovables.

Las Islas Canarias presentan 1.583 km de costa, lo que representa un 20 % del litoral español. Esto hace suponer que el archipiélago dispone de un importante potencial de energía undimotriz, especialmente en su costa norte, expuesta directamente al oleaje del Océano Atlántico Norte [1].

El potencial promedio anual en la costa norte de las islas está próximo a los 20 kW/m, situando a Canarias en segundo lugar en el ranking nacional en cuanto al contenido de energía media anual neta (TWh/año), tan solo por detrás de Galicia [1].

El archipiélago canario se origina de una naturaleza volcánica, como consecuencia de este fenómeno, las islas más antiguas: Lanzarote, Gran Canarias y Fuerteventura presentan una plataforma continental más amplia. No siendo de igual modo para las islas más recientes (La Palma y El Hierro) que presentan perfiles muy abruptos, sin apenas plataforma.

Tomando en consideración lo antes expuesto, el presente trabajo propone una caracterización de los potenciales undimotrices en la isla de Lanzarote y Fuerteventura, para lo cual se realizará una modelización de los mismos.

La investigación se centra en la evaluación de potenciales energéticos, no valorando ninguna tecnología específica. Tampoco se tendrán en cuenta criterios como los medioambientales, zonas protegidas (rutas de navegación, zonas de pesca, zonas de ejercicios militares, zonas de recreación, etc.), autorizaciones, licencias o permisos.

Se presenta un sistema Neuro-Fuzzy Genético con el objetivo de predecir los valores energéticos undimotrices de ciertos puntos, a partir de los valores conocidos de los puntos de simulación del oleaje de tercera generación (puntos WANA) más cercanos.

Los actuales modelos de predicciones del comportamiento del oleaje son capaces de entregarnos variables como: altura significativa de la ola, periodo medio, dirección media del oleaje, etc. Estos modelos son de gran ayuda para obtener valores orientativos a la hora de realizar cálculos de tipo energéticos, no siendo así cuando lo que se desea es instaurar un sistema de captación de energía de las olas, especialmente en las Islas Canarias. Esto se debe en gran medida a la escases de boyas para la toma de datos reales en el archipiélago, siendo inexistentes en las islas más orientales.

2. Materiales y métodos.

Los sistemas de captación energética del oleaje, son dispositivos que transforman la energía del oleaje en energía útil. Estos sistemas tienen que ser capaces de resistir los embates del mar y funcionar eficientemente para las amplias gamas de frecuencia y amplitud de las olas.

El grado de desarrollo tecnológico alcanzado hasta el momento es todavía insuficiente para hacer de esta una fuente de obtención de energía eléctrica competitiva. A pesar de eso, ya se ha comprobado que en sistemas marinos pueden existir grandes diferencias entre las inversiones iniciales de explotación y mantenimiento de proyectos: onshore, nearshore y offshore. Los costes de cimentación, anclaje y de las subestructuras en aguas marinas profundas pueden llegar a encarecer los proyectos entre un 15 % y un 20 % [2,3].

Tal y como se muestra en la Figura 1, Lanzarote y Fuerteventura presentan una plataforma continental más amplia que el resto de las islas, contando con una menor batimetría, lo que propicia el aprovechamiento de los recursos undimotrices en la región seleccionada, disminuyendo los costes asociados a la construcción y mantenimientos de los dispositivos de captación. Se puede destacar la baja frecuencia de eventos extremos del oleaje cercanos a ambas islas.

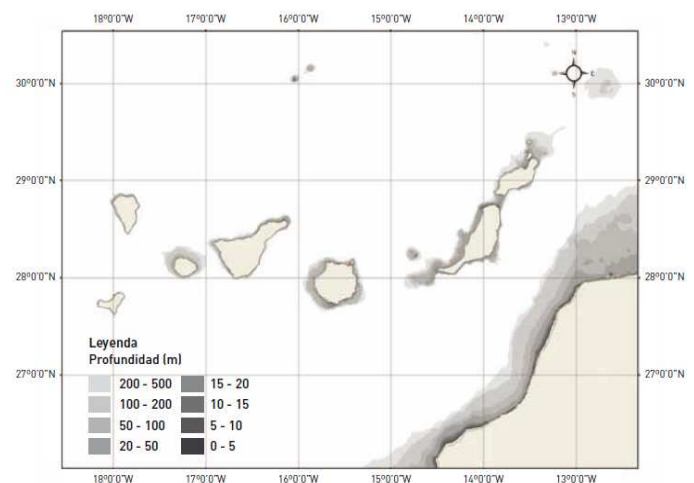


Figura 1. Batimetría de las Islas Canarias.

2.1 Toma de datos experimentales.

Para conseguir el objetivo que se persigue en este trabajo de investigación, el primer paso a llevar a cabo fue precisar una o varias fuentes fiables donde obtener los datos históricos de olas.

Estos datos fueron obtenidos a partir del “Organismo Público Puertos del Estado” (OPPE) y la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), los cuales facilitaron las series temporales de olas desde 1996 hasta el 2016.

En la actualidad, Puertos del Estado cuenta con una importante red de boyas para la toma de datos reales, pero estos sensores suelen estar vinculados en la mayor parte de los casos a instalaciones portuarias, no existiendo ninguna boya en las islas orientales de canarias, lo que dificulta el estudio de las regiones de interés a partir de mediciones reales [4].

Teniendo en consideración este inconveniente, la toma de datos de las olas en las aguas rodean a Lanzarote y Fuerteventura se realizará a partir de los resultados ofrecidos por la aplicación del modelo numérico (WANA) de simulación del oleaje de tercera generación en determinados puntos del litoral español, ofrecido por Puertos del Estado. La versión del modelo WANA utilizada en el Atlántico, para la predicción de olas, es de aguas profundas (más de 200 metro de profundidad) [4]. La decisión de tomar estos puntos WANA se basa principalmente en la necesidad de obtener valores energéticos que no estén afectados por ningún fenómeno producido por los fondos marinos. En estudios posteriores se podrá precisar la influencia de estos fenómenos en los potenciales energéticos marinos.

La Figura 2 detalla el espaciamiento de la malla considerada, en la misma se indica la ubicación y la nomenclatura de cada uno de los puntos de simulación WANA seleccionados para el estudio.

La Tabla 1 da a conocer los puntos de simulación WANA analizados y sus coordenadas en el Océano Atlántico Norte.



Figura 2. Puntos WANA seleccionados para el estudio en la isla de Lanzarote y Fuerteventura.

Tabla.1. Puntos WANA y sus coordenadas (Isla de Lanzarote y Fuerteventura).

Puntos WANA	Long.	Latitud.	Puntos WANA	Long.	Latitud.
1027018	13,25°W	29,50°N	1023014	14,25°W	28,50°N
1027016	13,25°W	29,00°N	1021012	14,75°W	28,00°N
1026018	13,50°W	29,50°N	1021013	14,75°W	28,00°N
1026015	13,50°W	28,75°N	1022013	14,50°W	28,25°N
1025018	13,75°W	29,50°N	1022011	14,50°W	27,75°N
1025017	13,75°W	29,25°N	1023011	14,25°W	27,75°N
1025015	13,75°W	28,75°N	1024012	14,00°W	28,00°N
1024016	14,00°W	29,00°N	1025013	13,75°W	28,25°N
1023015	14,25°W	28,75°N	1025014	13,75°W	28,50°N

Para la determinación de los potenciales undimotrices de la región en estudio, se toma la malla formada por dieciocho puntos WANA que se encuentran distribuidos alrededor de las islas de Lanzarote y Fuerteventura. A partir de los datos de altura significativa de las olas y sus periodos se procede a los cálculos.

2.2. Cálculo de la energía undimotriz.

Establecidos los puntos WANA para el estudio, se procede a determinar de forma orientativa cuáles de ellos pueden ser factibles para la explotación de la energía de las olas. Se realiza un análisis de los mismos y seleccionan los puntos que cumplen la siguiente condición: “la energía media de las olas ($E_{wave,med}$) es igual o mayor de 15,0 kW/m”.

Para determinar esta condición se emplea la ecuación:

$$E_{wave,med} = 0.8571A \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i^2 T_i \quad 2.1$$

en la que:

A es una contante ($0,34 \div 0,59$).

H es la altura significativa de la ola (m).

T es el período o tiempo de paso de dos olas consecutivas por una línea imaginaria a la mitad de la distancia entre la cresta y el valle (s).

n se presenta como el número de clase de los datos.

Determinados los puntos WANA que cumplen la condición, se procede al cálculo de los potenciales energéticos undimotrices (kWh/m). Para la realización de los mismos se ajustaron los datos de altura y el período de las olas a una distribución bidimensional, de la forma:

$$f(H,T) = \frac{k_1 k_2 \left(\frac{H}{c_1}\right)^{k_1-1} \left(\frac{T}{c_2}\right)^{k_2-1}}{c_1 c_2 (1-c_{12}^2)} \exp \left[-\frac{\left(\frac{H}{c_1}\right)^{k_1} + \left(\frac{T}{c_2}\right)^{k_2}}{1-c_{12}^2} \right] B_0 \left[\frac{2c_{12} \left(\frac{H}{c_1}\right)^{k_1/2} \left(\frac{T}{c_2}\right)^{k_2/2}}{1-c_{12}^2} \right] \quad 2.2$$

donde B_0 es la función de Bessel de orden 0 y c_1 , k_1 , c_2 , k_2 y c_{12} son coeficientes de distribución.

El cálculo de la energía de las olas puede ser resuelta numéricamente mediante la ecuación 2.3. En dicha expresión se incluye el periodo considerado en el estudio, $t = 730$ h.

$$E_{wave} = 0.8571 A t \sum_{H=0}^{H_{max}} \sum_{T=0}^{T_{max}-\Delta T} (H^2 T p \Big|_{H,T}^{H+\Delta H, T+\Delta T}) \quad 2.3$$

siendo $p \Big|_{H,T}^{H+\Delta H, T+\Delta T}$, la densidad de probabilidad acumulada para la distribución bidimensional en el intervalo rectangular definido por los límites $[H, H + \Delta H]$ y $[T, T + \Delta T]$.

La distribución bidimensional utilizada en cada caso, se ajustó a partir de los datos de altura y período correspondientes a cada uno de los meses. Esto permite conocer los meses de mayores y menores potenciales undimotrices, pudiendo realizar una valoración de los mismos.

Es válido recordar que la energía que se determina en este estudio equivale al 100 % de la energía útil en cada punto WANA. Esta energía debe de ser transformada por un captador de energía undimotriz, por lo que se verá afectada por la eficiencia de transformación energética de dicho equipo.

2.3 Técnica inteligente para la predicción de valores energéticos.

Puesto que el objetivo es construir un sistema que sea capaz de predecir los valores de la energía undimotriz en ciertos puntos WANA, a partir de los valores conocidos de los puntos WANA cercanos, se ha decidido utilizar un sistema con capacidad de aprendizaje. Particularmente se ha empleado un algoritmo Neuro-Fuzzy Genético [5] con el que a través de entrenamiento se pueda alcanzar una adecuada generalización y por tanto sea capaz de proporcionar los valores de energía que existiría en los diferentes puntos WANA de interés.

Los datos de los que se disponen corresponden a los valores energéticos promedios en kWh/m.mes de cada uno de los puntos mencionados anteriormente para los 12 meses del año. Por tanto, los valores que formarán el conjunto de datos para la realización del entrenamiento serán esas potencias, junto con las coordenadas de cada punto, latitud y longitud, además de un indicativo del mes al que corresponde dicha energía. El algoritmo constará de tres entradas y una salida. Dado que se pretende comprobar que el sistema es capaz de predecir la energía, se reservarán los datos de dos puntos WANA. Eso quiere decir, que los datos energéticos de esos puntos no serán utilizados en el entrenamiento y se usarán al finalizar el proceso como referencia para analizar la capacidad de generalización del sistema.

El sistema Neuro-Fuzzy Genético empleado tiene una estructura similar a la propuesta por Jang [5,6], formada por tres capas. El algoritmo depende de tres parámetros que serán obtenidos mediante el proceso de entrenamiento. En particular, nos referimos a los centros de las funciones de pertenencia, su ancho y las salidas estimadas. Para alcanzar los mejores valores para estos parámetros el entrenamiento se

divide en tres fases. Las dos primeras son las encargadas de proporcionar los valores iniciales a algunos parámetros y de optimizar el número de nodos de la capa oculta, es decir, el número de reglas. Y la última fase reajusta los valores de los parámetros obtenidos en las fases anteriores.

En la primera fase se obtienen los valores iniciales de los centros de las funciones de pertenencia y de las salidas estimadas a través de la aplicación de un algoritmo basado en una Red Neuronal Artificial Kohonen [7]. Por otro lado, el vector inicial de pesos del mapa auto-organizativo se calcula a través de la media de los valores máximo y mínimo de las entradas proporcionadas. A continuación se determina el nodo 'ganador' para actualizar los pesos empleando un mapa auto-organizativo monodimensional. El número de vectores de pesos escogido corresponderá con el número de neuronas de la capa oculta del sistema Neuro-Fuzzy Genético. Una vez se ha determinado el nodo 'ganador' se calculan los nuevos pesos. Cada vector de pesos se asocia con cada neurona de la capa oculta, de manera que las funciones de pertenencia y las salidas estimadas se determinan por los componentes del vector de pesos asociados. Puesto que el número de nodos de la capa oculta está relacionado con el número de reglas, es necesario un proceso de optimización para obtener un número mínimo de reglas.

Una vez establecidos en la primera fase valores para los centros de las funciones de base radial y los valores estimados, en la segunda fase se debe decidir qué reglas asociadas a la capa oculta serían de interés en la resolución del problema y de cuales podríamos prescindir. En este sentido en esta fase del entrenamiento se introducen técnicas de algoritmos genéticos [8]. Se plantea como individuo una posible solución, entendida tal como la elección de un cierto conjunto de reglas y un cierto conjunto de valores de las funciones de pertenencia, tomando los valores calculados en la fase previa. A estos individuos se les aplican operadores de cruce y mutación, obteniendo nuevas posibles soluciones (individuos). En este caso, se elige como función de costo, la evaluación del error a partir de los valores reales.

Finalmente, en la última fase del entrenamiento se ajustan los parámetros del sistema obtenidos en las fases anteriores. Se emplea el algoritmo de aprendizaje de mínimos cuadrados debido a la similitud de este sistema con una red de base radial [9]. Este algoritmo trata de minimizar la

función criterio establecida que analiza la diferencia entre las salidas proporcionadas y las deseadas.

3 Resultados y discusión.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la evaluación del potencial undimotriz en los diferentes puntos WANA. Los mismos se representan de forma gráfica, de modo que pueda visualizarse de manera más sistemática y resumida.

Para el análisis de la energía undimotriz, se parte de la obtención de los valores de la energía media de las olas para cada punto, a partir de series temporales de datos. Estos valores se muestran en la Figura 3.

Las barras blancas simbolizan los puntos WANA donde se cumple que la energía media undimotriz es mayor de 15 kW/m. Estos serían las ubicaciones factibles desde el punto de vista energético, sumando 10 en total. Los puntos representados con las barras negras son las localizaciones que se desecharán para el estudio, presentando una energía media menor de 15 kW/m. Los puntos WANA seleccionados para el cálculo de potencia de las olas se dan a conocer en la Tabla 2.

Tal y como se puede apreciar, las 10 zonas seleccionadas para el estudio se encuentran localizadas al norte y el noreste de las islas, de cara al Océano Atlántico Norte. Esto se debe a los potenciales energéticos renovables presentes en la región, dada la influencia de los vientos Alisios durante casi todo el año, la latitud donde se encuentran las islas y a la proximidad del anticiclón de las Azores.

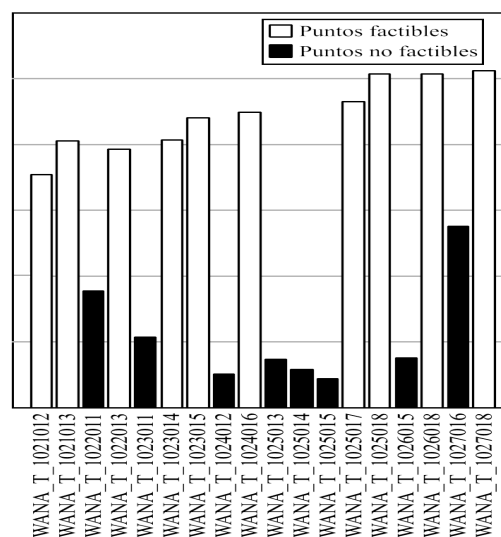


Figura 3. Potencia media del oleaje en Lanzarote y Fuerteventura.

Tabla.2. Puntos WANA seleccionados (energía media ≥ 15 kW/m).

Puntos WANA	Long.	Latitud	Puntos WANA	Long.	Latitud
1027018	13,25°W	29,50°N	1023015	14,25°W	28,75°N
1026018	13,50°W	29,50°N	1023014	14,25°W	28,50°N
1025018	13,75°W	29,50°N	1021012	14,75°W	28,00°N
1025017	13,75°W	29,25°N	1021013	14,75°W	28,00°N
1024016	14,00°W	29,00°N	1022013	14,50°W	28,25°N

3.1. Distribución probabilística bidimensional de Weibull.

En la Figura 4 se dan a conocer las distribuciones probabilísticas bidimensionales de Weibull para el oleaje durante el periodo de un año para algunos de los puntos WANA seleccionados (energía media ≥ 15 kW/m), la que depende del comportamiento de periodo de las olas (T) y la altura (H) de las mismas.

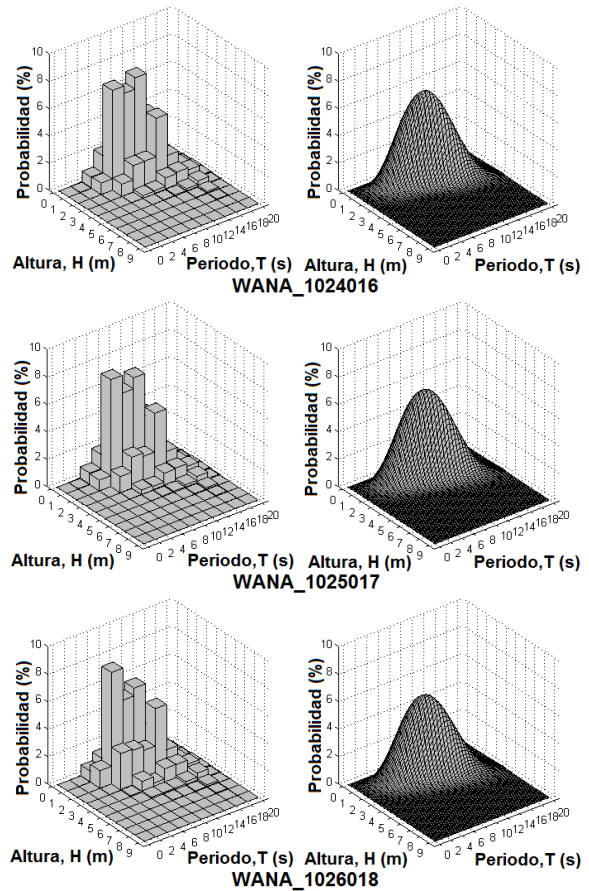
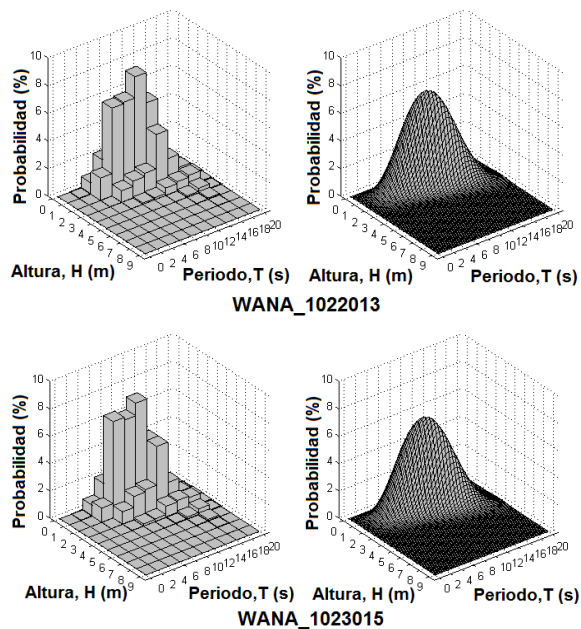


Figura 4. Distribuciones probabilística bidimensional de Weibull para los puntos WANA: 1022013; 1023015; 1024016; 1025017 y 1026018.

Al analizar el comportamiento de la distribución probabilística bidimensional anual del oleaje, es válido destacar que las mayores probabilidades ocurren con altura (H) de olas entre 1,0 y 2,0 metros y periodos (T) entre 6,0 y 14,0 segundos. Las menores coincidencias pueden ocurrir con valores de altura muy bajos ($0 \div 1,0$) y valores entre 3,0 y 7,0 metros con periodos que pueden ir desde los 2,0 hasta los 20 segundos.

3.2. Energía de las olas.

El cálculo de la potencia de las olas se desarrolla a partir de la distribución probabilística bidimensional de Weibull. El tiempo considerado en el estudio es de un mes (730 h). La energía será dada en función de los metros lineales (kWh/m mes). La Figura 5 muestra los valores mensuales que puede llegar a alcanzar la potencia undimotriz para cada uno de los cinco puntos WANA analizados en la Figura 4.

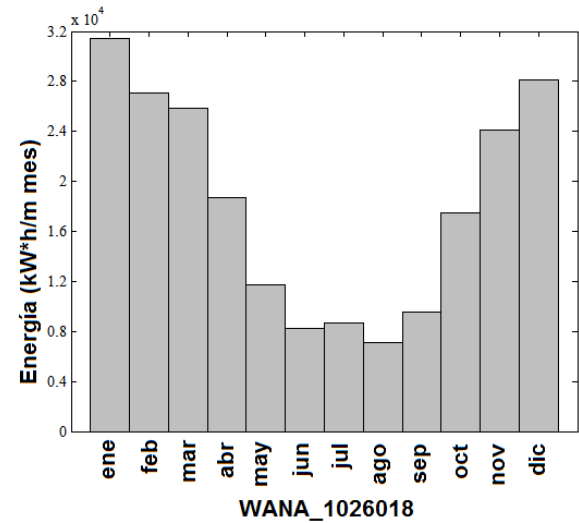
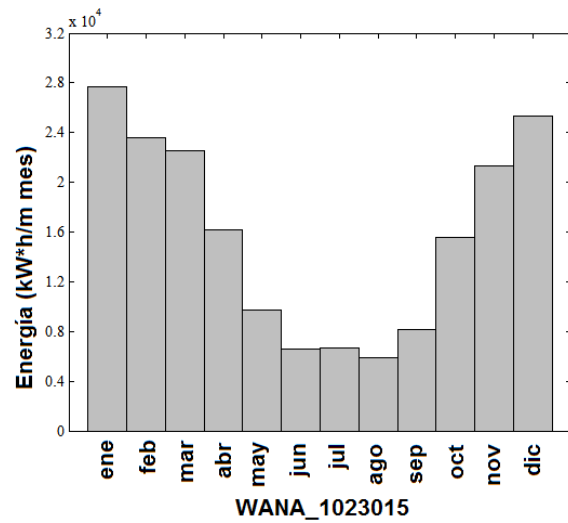
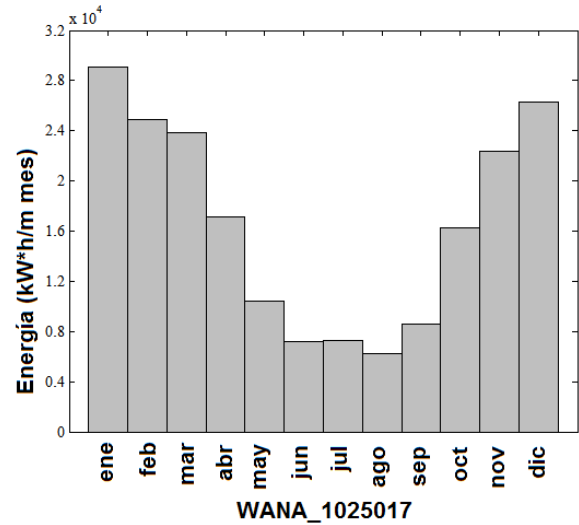
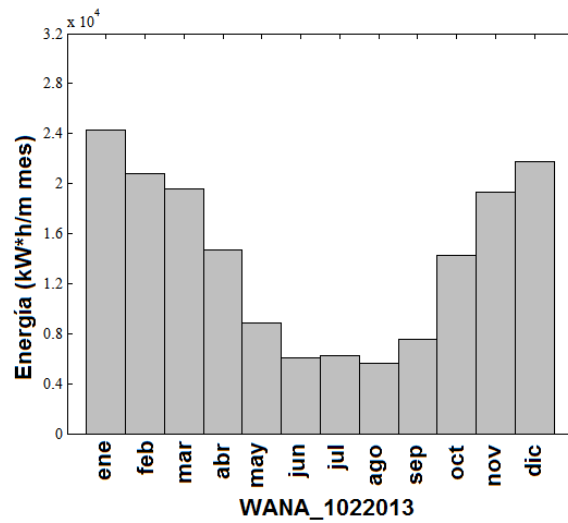
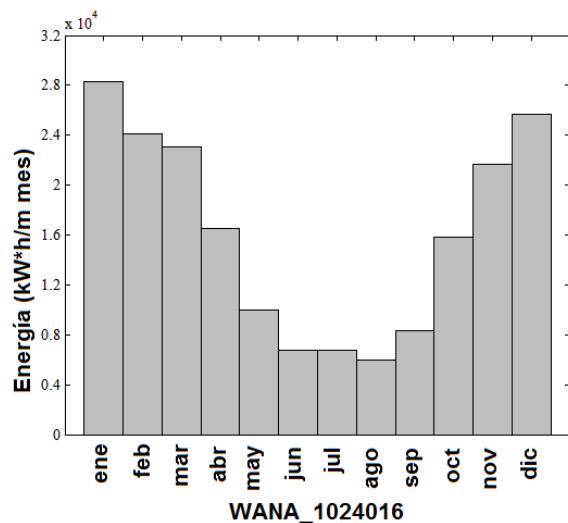


Figura 5. Energía undimotriz por meses del año (kWh/m mes) en los puntos WANA: 1023015; 1022013; 1024016; 1025017 y 1026018.



En todas las gráficas de barras que se muestra en la Figura 5, se observa que en los puntos WANA analizados, los mayores valores energéticos procedentes de las olas ocurren en los meses de invierno: diciembre y enero, con valores que pueden oscilar entre los 21,75 y los 31,75 MWh/m mes. El mes de agosto es el que presenta menores aportes de energía, con valores que rondan entre los 5,61 y los 7,3 MWh/m mes.

La suma total de la potencia de las olas que puede llegar a incidir por metro lineal durante el transcurso de un año en cada uno de los 10 puntos WANA analizados en el estudio se da a conocer en la Tabla 3.

Tabla 3. Energía de las olas por año (kWh/m año) en los 10 puntos WANA.

Puntos WANA	Energía undimotriz (kWh/m año)
1027018	220.541
1026018	217.996
1025018	217.561
1025017	199.482
1024016	192.888
1023015	188.989
1023014	174.741
1021012	151.826
1021013	173.817
1022013	168.979

En la tabla anterior aparecen los valores energéticos anuales procedentes de las olas que tienen lugar en los diferentes puntos analizados. Tal y como se muestra, los potenciales oscilan aproximadamente entre los 152,0 y los 220,5 MWh/m año. El punto WANA de mayores potenciales es el 1027018 con 220.541 kWh/m año, siendo este uno de los más orientales de todos los puntos estudiados.

4 Predicción de valores energéticos.

Una vez se han concluido las tres fases del entrenamiento expuestas en la sección 2.3, se introducen valores que el sistema desconoce. En este caso se han reservado los datos vinculados a los puntos WANA 1026018 y 1022013 de Lanzarote y Fuerteventura respectivamente. Esto quiere decir, que le indicaremos al sistema Neuro-Fuzzy entrenado las coordenadas y el mes de estos puntos WANA y nos proporcionará un valor orientativo de su energía undimotriz.

En las tablas 4 y 5 se muestra la comparación entre los valores que proporciona el sistema y las salidas esperadas, que corresponden con las mediciones reales sobre ese punto en kWh/m.mes para cada uno de los meses del año. Hay que hacer hincapié en que los valores de las entradas son desconocidos, lo que quiere decir que el sistema no los ha utilizado para entrenarse.

Tabla 4. Comparación entre salida real y la salida del Neuro-Fuzzy para el punto WANA 1026018.

Punto WANA 1026018	
Salida real (kWh/m mes)	Salida proporcionada (kWh/m mes)
31.437	28.000
27.055	25.000
25.827	25.000
18.716	22.000
11.687	20.000
82.81	15.000
86.74	10.000
71.16	11.000
95.25	11.000
17.464	20.000
24.131	25.000
28.083	25.000

Tabla 5. Comparación entre salida real y la salida del Neuro-Fuzzy para el punto WANA 1022013.

Punto WANA 1022013	
Salida real (kWh/m mes)	Salida proporcionada (kWh/m mes)
24.257	25.000
20.773	25.000
19.570	21.000
14.659	11.000
8.888	11.000
6.102	9.000
6.240	9.000
5.609	10.000
7.571	10.000
14.272	10.000
19.289	22.000
21.749	25.000

Analizando ambas tablas se puede comprobar que el sistema Neuro-Fuzzy Genético ha alcanzado un nivel de generalización satisfactorio. La mayor parte de los resultados presentan variaciones en torno al 10 % con respecto al valor energético real. Aquellos que muestran mayores diferencias son los resultados 5 y 6, correspondientes a mayo y junio, en el punto WANA 1026018, y el dato número 8, que se corresponde con el mes de agosto, en el punto WANA 1022013. En referencia a estas grandes variaciones, próximas al 50 %, hay que hacer hincapié en que el estudio energético que se realiza en los distintos puntos WANA pretende analizar la viabilidad de esos puntos para la instalación de captadores, por lo tanto se realizará un estudio general anual y no únicamente un análisis de un mes

en particular. De esta manera, aunque el sistema muestre en algunos meses valores energéticos muy diferentes a los que debe indicar, al examinar el conjunto de los valores proporcionados a lo largo de todo un año, el sistema Neuro-Fuzzy Genético es capaz de realizar un buen análisis global.

5 Conclusiones.

1- Los mayores valores energéticos procedentes de las olas en los puntos WANA seleccionados ocurren en los meses de invierno: diciembre y enero, con valores que oscilan entre los 18,65 y los 31,75 MWh/m mes.

2- El mes de agosto es el que presenta menores aportes de energía para todos los puntos WANA, con valores que rondan entre los 5,5 y los 7,3 MWh/m mes.

3- Los valores energéticos anuales procedentes de las olas que se pueden obtener en cada uno de los puntos WANA analizados oscilan aproximadamente entre los 152,0 y 220,5 MWh/m año.

4- El punto WANA que presenta mayores potenciales de los analizados es el 1027018 con 220.541 kWh/m año, siendo el más oriental de todos los puntos estudiados.

5- Estos primeros resultados nos permiten determinar el interés que dichas zonas tienen de cara a hacer un estudio más exhaustivo en términos de poder evaluar la posibilidad de aprovechamiento de dichos potenciales por medio de diferentes dispositivos de captura de energía undimotriz.

6- En este estudio se ha analizado una técnica basada en algoritmos de inteligencia artificial al objeto de determinar un posible predictor de energía de las olas que vaya más allá de los puntos de malla calculado.

7- Los resultados ponen de manifiesto la conveniencia de la herramienta, si bien es necesario seguir realizando un estudio incorporando nuevas variables que hagan más efectivo el predictor, incluyendo adicionalmente aspectos socio-económicos y medioambientales que tienen un papel importante en la rentabilidad y viabilidad de emplazamiento de un capturador de energía undimotriz en esas localizaciones específicas.

Agradecimientos.

“Este trabajo ha sido cofinanciado por fondos FEDER, Programa Interreg MAC 2014-2020, en el marco del proyecto DESAL+ (MAC/1.1a/094)” y por el Proyecto Nacional DPI2015-69325- C2-2-R (MINECO/FEDER, UE).

Referencias

- [1] IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), (2010). Evaluación del potencial de la energía de las olas. Estudio Técnico. PER 2011-2020.
- [2] Aranzadi, P., (2010). Valoración del entorno de simulación SESAM para el diseño de una estructura marina de tipo celosía. Trabajo de titulación de Ingeniero Industrial, Universidad pública de Navarra.
- [3] Ruiz, J. P., 2007. Aprovechamiento de la Energía de las Olas. Robotiker-TECNALIA (2da Jornada Internacional sobre Energía Marina), Bilbao
- [4] Puertos del Estado, 2017. Conjunto de datos WANA: http://calipso.puertos.es//BD/informes/INT_WANA.pdf
- [5] Marichal GN, Del Castillo ML, López J, Padrón I, Artés M. (2016) “An Artificial Intelligence Approach for Gears Diagnostics in AUVs. Wang X, ed. Sensors.” (Basel, Switzerland), 16(4):529. doi:10.3390/s16040529.
- [6] Jang, J.R. (1993) ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. IEEE Trans. Syst. Man Cybernetics, 23, pp. 665–685.
- [7] Kohonen T., (2001) Self-Organizing Maps. Springer Series in Information Sciences, Vol. 30, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- [8] Goldberg D. E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison Wesley Publishing Company, January 1989
- [9] Chen, Cowan C. F. N., and Grant P. M., (1991) “Orthogonal least squares learning algorithm for radial basis function networks,” IEEE Trans. Neural Networks, vol. 2, no. 2, Mar., pp. 302-309.

Aplicación de Redes Neuronales para la Estimación de la Resistencia al Avance de Buques

Daniel Marón
Seaplace S.L., dmaron@ucm.es

Matilde Santos
Facultad de Informática, Universidad Complutense de Madrid, msantos@ucm.es

Resumen

En este artículo se ha estudiado la aplicación de las redes neuronales artificiales para la estimación de la resistencia al avance de los buques, como alternativa a modelos de regresiones estadísticas usados tradicionalmente. Se ha creado una herramienta para la estimación de la resistencia viscosa y la resistencia por formación de olas. Los resultados indican una buena correlación entre la base de datos y las estimaciones realizadas, con unas ventajas importantes respecto a los métodos tradicionales, como son la fácil implementación y la posibilidad de re-entrenar la red neuronal con nuevos datos experimentales o incluso incluyendo nuevas variables de entrada.

Palabras clave: Red Neuronal, Resistencia al Avance, Método de Holtrop y Mennen.

Glosario de términos

B	Manga del buque (m)
C_{FPP}	Coefficiente de resistencia de fricción de placa plana
C_V	Coefficiente de resistencia de origen viscoso
C_W	Coefficiente de resistencia por formación de olas
F_n	Número de Froude
g	Aceleración de la gravedad (m/s^2)
i_E	Ángulo de entrada en la flotación ($^\circ$)
L	Eslora en la flotación del buque (m)
r	Factor de forma (-)
R	Resistencia al avance del buque (kN)
R_{FPP}	Res. de fricción de placa plana (kN)
R_V	Resistencia de origen viscoso (kN)
R_W	Resistencia por formación de olas (kN)
S	Superficie mojada del buque (m^2)
T	Calado del buque (m)
V	Velocidad del buque (m/s)
(1+k)	Factor de forma (r)
ρ	Densidad del fluido (t/m^3)
∇	Volumen de desplazamiento (m^3)

1 INTRODUCCIÓN

En las fases iniciales del diseño de buques se utilizan métodos tradicionales, basados en regresiones estadísticas, para la estimación de la resistencia al avance de buques. Esta información es de gran interés para el diseño de la planta propulsora del buque, la planta eléctrica y la autonomía, entre otros.

El objetivo de este trabajo es evaluar la aplicación de las redes neuronales para la estimación de la resistencia al avance de buques en las etapas preliminares de diseño, a partir de datos, preferiblemente experimentales obtenidos en canales de ensayos hidrodinámicos, como por ejemplo [3].

Aunque ya existen métodos basados en regresiones, las ventajas de la utilización de las redes neuronales en la estimación de la resistencia al avance son amplias, como puede ser la adaptación a diferentes tipos de buques, la no linealidad del método, o el aprendizaje continuo de la red que puede ser alimentada por datos nuevos continuamente. Re-entrenar una red neuronal, una vez que su arquitectura está definida, es más sencillo y rápido que reajustar un método estadístico.

Los experimentos realizados en canales de ensayos son muy valiosos para los centros de investigación relacionados con el mundo de la Ingeniería Naval, pues es parte del “know-how” y las herramientas con las que cuentan, y son una información sensible. Por esta razón, es complicado acceder a estas bases de datos, y las que existen de carácter público son limitadas.

En este artículo, por tanto, se ha estudiado la aplicabilidad de las redes neuronales al problema, para utilizarlas en un futuro con datos experimentales reales. Para ello se ha creado una base de datos ficticia de resistencia, a partir de un método reconocido en la Ingeniería Naval, sobre la que analizar la aplicabilidad de las redes neuronales a la predicción de la resistencia al avance.

El método utilizado para la creación de una base de datos adecuada es el conocido como método de Holtrop y Mennen [5]. En éste se estima la resistencia al avance del buque en función de sus dimensiones y parámetros básicos, conocidos en las fases iniciales del proyecto.

Los resultados muestran una buena correlación entre los datos estimados mediante el método de regresión y la red neuronal. Esto indica que las redes neuronales pueden tener potencial en este campo, y sería de interés realizar este ejercicio con datos experimentales reales de un canal de ensayos.

En el artículo en primer lugar se va a introducir el concepto de la resistencia al avance, después se va a explicar la metodología seguida para la creación de la red neuronal y la arquitectura de la red considerada. A continuación, se comenta la generación de la base de datos de buques simulados para entrenar la red neuronal, y por último se muestran los resultados y se obtienen las conclusiones.

2 RESISTENCIA AL AVANCE

2.1 Introducción a la resistencia al avance

La resistencia al avance de los buques estudia todas aquellas fuerzas que se oponen al movimiento rectilíneo longitudinal del buque, es decir al avance del mismo, en aguas tranquilas. En otras palabras, la resistencia al avance de un buque a una determinada velocidad es la que opone el fluido al movimiento.

La resistencia al avance se puede descomponer de varias formas, según la hipótesis seguida. En este trabajo se va a tomar la hipótesis de Hughes [2], en la que la resistencia se divide en una componente viscosa y otra por formación de olas.

$$R = R_v + R_w \quad (1)$$

2.2 Resistencia viscosa

La resistencia viscosa se debe a la viscosidad del fluido, interviniendo por tanto la fricción del casco con el fluido y los cambios de presión que se producen por las curvaturas de la carena.

Esta resistencia se suele dividir en la resistencia de fricción de placa plana y la resistencia de formas. La primera representa la resistencia de fricción que tendría una placa plana con una superficie mojada equivalente. La segunda representa toda aquella resistencia viscosa diferente de la resistencia de placa plana, que se produce por las curvaturas del casco.

La resistencia viscosa se define por tanto como:

$$R_v = R_{FPP} + R_{Formas} = C_{FPP} \cdot r \quad (2)$$

Donde r es el denominado factor de forma, siendo siempre mayor que 1. El factor r se denomina en muchos casos $(1+k)$.

2.3 Resistencia por formación de olas

Cuando un cuerpo navega flotando en una superficie libre entre dos fluidos (agua-aire), el campo de presiones que se produce alrededor del mismo genera un tren de olas que acompaña al cuerpo en su movimiento.

Este tren de olas modifica el campo de presiones, de tal manera que en algunos puntos aumenta y en otros disminuye. Al integrar este campo de presiones aparece una nueva fuerza que se opone al movimiento llamada resistencia por formación de olas.

La resistencia por formación de olas depende fundamentalmente de la velocidad del buque y de las formas y el tamaño del mismo.

2.4 Resistencia total

Sumando las dos componentes principales de la resistencia, se obtendría la resistencia total al avance del buque.

La expresión (1) se puede escribir de la siguiente manera, facilitando el análisis de la resistencia:

$$R = R_{FPP} \cdot (1+k) + R_w \quad (3)$$

A este valor, que hemos llamado resistencia total, habría que sumar otras componentes normalmente de una magnitud menor, como son la resistencia debida a los apéndices o los propulsores de proa entre otras. Esas componentes, dependen de cada buque en particular, y se van a dejar fuera del presente análisis, centrándose en la estimación de la resistencia viscosa y la resistencia por formación de olas.

2.5 Coeficientes de resistencia

Los valores de la resistencia al avance se suelen tratar de manera no dimensional, a través de los coeficientes de resistencia al avance.

Los coeficientes de resistencia por fricción de placa plana y resistencia viscosa se define normalmente como:

$$C_{FPP} = \frac{R_{FPP}}{1/2 \rho S V^2} \quad (4)$$

$$C_v = \frac{R_v}{1/2 \rho S V^2} \quad (5)$$

El coeficiente de resistencia por formación de olas como:

$$C_w = \frac{R_w}{\rho g \nabla} \quad (6)$$

Cabe destacar también una variable importante y que tiene una gran influencia en la resistencia por formación de olas, el número de Froude. Este número relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido, y en este tipo de problema se define como:

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (7)$$

3 DESARROLLO DE LA RED NEURONAL

3.1 Metodología

Para entrenar la red neuronal se necesita una base de datos compuesta de experimentos o datos simulados, como es este caso.

El primer paso del desarrollo de esta herramienta ha sido la creación de una base de datos a partir de regresiones estadísticas, que se explicará más adelante. Para crear esta base de datos se han seleccionado unos rangos de valores entre unos límites adecuados de aplicación, como por ejemplo un número de Froude máximo de 0.40.

Después, se han analizado los parámetros de los que dependen en cierta medida las variables que queremos estimar, definiéndose unos parámetros de entrada y de salida de la red neuronal. La selección de estos parámetros es una de las claves, y por ello se han analizado varias configuraciones.

Se ha desarrollado la arquitectura de la red neuronal, y se han configurado sus funciones de activación, método de entrenamiento, valores de parada etc. Posteriormente se ha llevado a cabo el entrenamiento de la red neuronal, para ambas salidas, y se han ido afinando los parámetros y modificando la configuración de la red en busca de mejores resultados; como por ejemplo variando el número de capas ocultas o el algoritmo de entrenamiento.

3.2 Parámetros de entrada y salida

Los parámetros de entrada a la red neuronal serán valores conocidos, o fácilmente estimables, en las fases iniciales de diseño. Además, deben ser parámetros de los que la salida tenga una cierta dependencia directa o indirecta, intentando minimizar

el número de parámetros de entrada sin perder precisión en la salida.

La resistencia viscosa queda definida por el coeficiente de fricción de placa plana, estimado según [7], y el factor de forma. Los valores de salida de la red serán por tanto el factor de forma y el coeficiente de resistencia por formación de olas; que se tratarán de forma independiente, pues dependen de parámetros diferentes.

3.2.1 Parámetros de entrada: factor de forma

Los parámetros de entrada para la predicción del factor de forma (1+k) se han reducido a los siguientes:

- i. Eslora en la flotación (L).
- ii. Manga del buque (B).
- iii. Calado (T).
- iv. Coeficiente prismático (C_P).
- v. Coeficiente de la sección maestra (C_M).

3.2.2 Parámetros de entrada: coeficiente de resistencia por formación de olas

Los parámetros de entrada para la predicción del coeficiente de resistencia por formación de olas (C_w) seleccionados son:

- i. Eslora en la flotación (L).
- ii. Manga (B).
- iii. Calado (T).
- iv. Coeficiente prismático (C_P).
- v. Coeficiente de la sección maestra (C_M).
- vi. Ángulo de entrada en la flotación (iE).
- vii. Número de Froude (F_n).
- viii. Coeficiente del área de la flotación (C_{WP}).
- ix. Superficie mojada (S).

Se han realizado tres casos, con diferentes parámetros. En el caso 1, se han considerado los parámetros de entrada de i a vii. En el caso 2 se han tomado desde el i al viii, y en el caso 3 se han considerado todos los parámetros.

La dependencia de la resistencia por formación de olas en estos parámetros tiene un carácter no-lineal, especialmente en el número de Froude. Esta es una ventaja importante de las redes neuronales respecto a las regresiones estadísticas, pues se adaptarán mejor a esta relación de comportamiento no-lineal.

3.3 Arquitectura de la red neuronal

Para el desarrollo de la red neuronal se ha utilizado la herramienta de Matlab "Neural Network Toolbox" [9].

Se ha realizado una red neuronal del tipo Feed-Forward multicapa, con un número a determinar de capas ocultas. Tras el análisis se ha considerado que el número de capas óptimo para la herramienta es de 10 capas en el caso de la estimación del factor de forma, y de 20 capas para el coeficiente de olas. Las funciones de activación son del tipo sigmoide (tangente hiperbólica), utilizadas generalmente en redes neuronales multicapa.

La red neuronal necesita ser entrenada a partir de una base de datos, de tal manera que se ajustan los pesos de cada una de las neuronas. Para el entrenamiento de la red neuronal, se ha utilizado el algoritmo Levenberg-Marquardt, utilizado para resolver problemas no lineales de mínimos cuadrados.

Para llevar a cabo este entrenamiento se ha subdividido la base de datos en tres grupos:

- Set de entrenamiento: usada para entrenar la red neuronal, para ajustar los pesos de las neuronas. Se ha fijado en el 70% de los datos.
- Set de validación: se utiliza para afinar otros parámetros de la red neuronal, y para detener el entrenamiento cuando se llega a un límite. Se ha fijado en un 15% de los datos.
- Set de evaluación: se utiliza para evaluar el error que se produce en el ajuste con la red neuronal, y no tiene ninguna influencia en el entrenamiento de la red. Se ha fijado en un 15% de los datos.

En cuanto a la medida del error en la estimación durante el entrenamiento de la red, se han utilizado dos parámetros, el error cuadrático medio y el coeficiente de correlación R.

4 BASE DE DATOS

4.1 Método de Holtrop & Mennen

Al no poseer información sobre la resistencia al avance de buques ensayados en canales hidrodinámicos, se ha utilizado el método de Holtrop & Mennen. Este método se basa en la aplicación de regresiones estadísticas a una serie de buques ensayados a escala en un canal de ensayos hidrodinámicos [5].

Así, se desarrollará la red neuronal a partir de una base de datos simulada con dicho método. Éste predice el valor de las diferentes componentes de la resistencia al avance de los buques, y aporta regresiones estadísticas para la estimación de algunos parámetros de las formas de la carena, como son la superficie mojada o el ángulo de entrada en la flotación.

El coeficiente de resistencia de fricción de placa plana se estima de acuerdo a la fórmula ITTC 57 [7], en función del número de Reynolds del buque.

$$C_{FFP} = \frac{0.075}{(\log_{10}(Re) - 2)^2} \quad (8)$$

Para la estimación del factor de forma (1+k) y el coeficiente de resistencia por formación de olas, se sugieren regresiones dependientes de las dimensiones del buque y las formas del casco.

4.2 Desarrollo de la base de datos

Para desarrollar la base de datos se ha programado una herramienta en la que se introducen unos rangos de los valores que describen la carena de un buque, y se simula una base de datos de buques mediante la aplicación del método de Holtrop y otras regresiones lineales para la estimación de parámetros como el coeficiente de la flotación [1].

En la Figura 1 se presenta un esquema de la filosofía de esta herramienta.

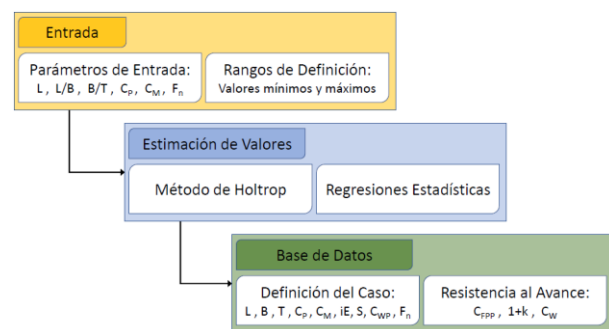


Figura 1: Desarrollo de la Base de Datos

Los parámetros de entrada considerados para la creación de la base de datos simulada son los siguientes:

- Eslora en la flotación (L).
- Relación Eslora/Manga (L/B).
- Relación Manga/Calado (B/T).
- Coeficiente de bloque (C_B).
- Coeficiente de la sección maestra (C_M).
- Número de Froude (Fn).

Los parámetros de salida de la herramienta de base de datos se dividen en los parámetros que definen cada caso, los indicados en los apartados 3.2.1 y 3.2.2; y los valores de los coeficientes de la resistencia para cada uno de esos casos (C_{FFP}, 1+k, C_w).

4.3 Rangos de valores de la base de datos

Los valores de entrada a la herramienta para la creación de la base de datos, se han limitado a los indicados en la Tabla 1, donde se indica el valor mínimo y el máximo del rango de los parámetros considerados, y el número de valores en ese rango para cada parámetro de entrada. De esta manera se ha obtenido una base de datos de simulación de 12000 casos.

Tabla 1: Rangos de Valores de Entrada para la generación de la base de datos.

Parámetro	Mín.	Máx.	n
L	100	200	3
L/B	4	10	5
B/T	2.2	3.8	4
C _B	0.55	0.82	5
C _M	0.93	0.98	4
Fn	0.15	0.40	10

5 RESULTADOS

Para la generación de las redes neuronales, se ha utilizado una herramienta en Matlab. En este apartado se van a presentar los resultados obtenidos con esta herramienta, comparándose con los valores de la base de datos de buques que se ha simulado.

5.1 Predicción del factor de forma

La correlación entre los datos simulados para la base de datos mediante el método de Holtrop & Mennen, y la predicción conseguida por la red neuronal es muy buena. En la Tabla 2 se indica la medida de precisión obtenida.

Se muestran también la curva de regresión, y el histograma de error de los datos generados con la red neuronal para la estimación del factor de forma (1+k) (Figura 2 y Figura 3).

Tabla 2: Precisión de estimación del factor de forma.

Variable	Valor
Error cuadrático medio	1.98 e-7
Coefficiente de correlación R	0.999
Desviación Estándar	4.44 e-4
Máximo error absoluto	2.19 e-3

Además, se ha tomado una selección aleatoria de aproximadamente el 1% de la muestra, comparándose entre los valores de la base de datos y los estimados con la red neuronal (Figura 4).

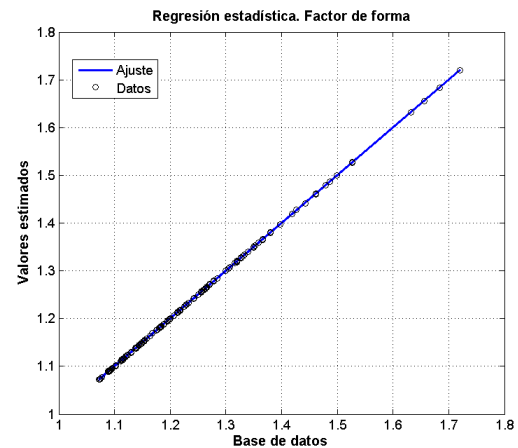


Figura 2: Regresión estadística. Factor de Forma

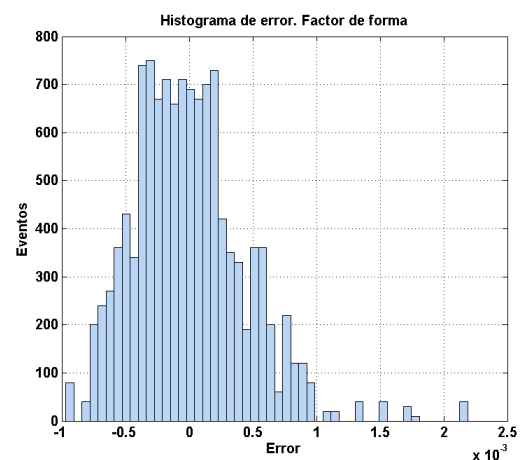


Figura 3: Histograma de error. Factor de Forma

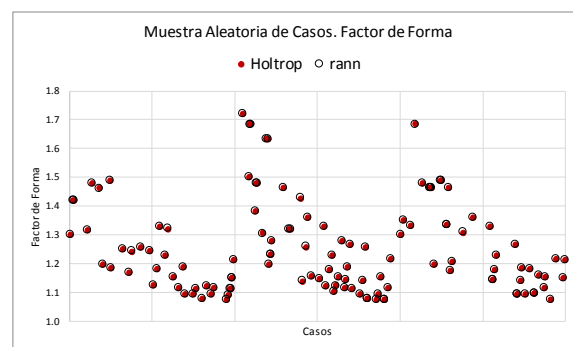


Figura 4: Muestra aleatoria. Factor de Forma

5.2 Predicción del coeficiente de resistencia por formación de olas

5.2.1 Resultados obtenidos

Se han analizado 3 casos, con diferentes parámetros de entrada. En el caso 1 se han considerado los siete primeros parámetros definidos en 3.2.2. En el caso 2,

se ha añadido el octavo parámetro, y en el caso 3 se ha incrementado las entradas hasta el noveno.

Así, se pretende conocer si la predicción de la estimación del coeficiente de resistencia por formación de olas, mejora añadiendo el coeficiente del área de la flotación y la superficie mojada del buque.

En la Tabla 3 se presentan los valores de error obtenidos mediante la estimación con la red neuronal para los 3 casos estudiados.

Tabla 3: Precisión de estimación del C_w .

Variable	Caso 1	Caso 2	Caso 3
ECM	1.93 e-7	4.48 e-8	1.35 e-7
Coeficiente R	0.9978	0.9995	0.9984
Desv. Estándar	4.39 e-4	2.12 e-4	3.68 e-4
Máx. error abs.	2.16 e-3	1.10 e-3	1.75 e-3

Los tres casos muestran una buena correlación entre los datos de entrada y los de salida, siendo el caso 2 el que presenta parámetros de error ligeramente mejores. El tiempo que se ha tardado en entrenar las redes neuronales es similar en todos los casos, variando entre unos 60 y 90 segundos.

Analizando estos resultados, se ha decidido considerar finalmente el caso 2 para la predicción de la resistencia al avance.

5.2.2 Resultados del caso 2

En el caso de la estimación del coeficiente de resistencia por formación de olas, la correlación con los datos objetivo es ligeramente peor que la conseguida para el factor de forma. Teniendo en cuenta el gran carácter no lineal de este parámetro, sobre todo respecto del número de Froude, era de esperar este resultado.

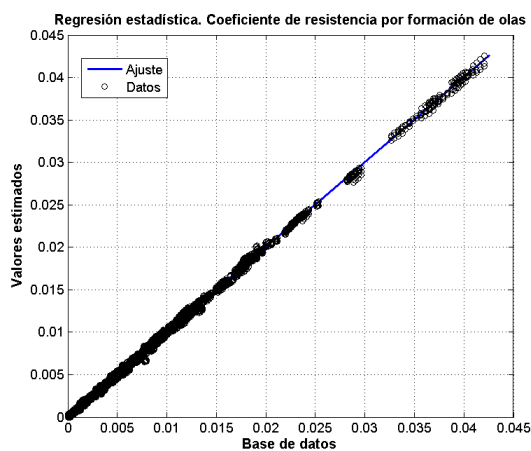


Figura 5: Regresión estadística. C_w

Los resultados son buenos, y muestran una buena aproximación a la base de datos de los buques simulados. En la Figura 5 se presenta la regresión estadística, y en la Figura 6 el histograma de error de los resultados obtenidos con la red neuronal.

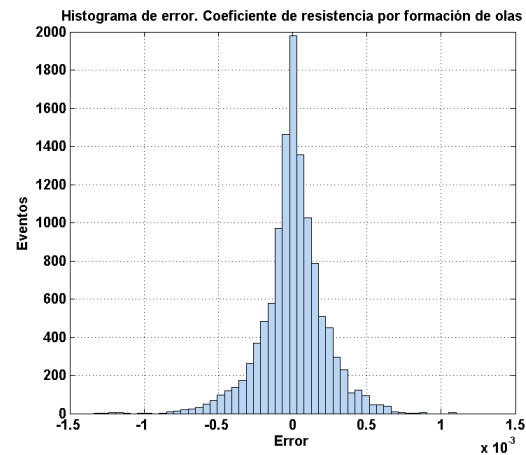


Figura 6: Histograma de error. C_w

Al igual que en el caso anterior, se ha seleccionado una muestra aleatoria de un 1% de la población, comparándose los resultados obtenidos con los datos de los buques de la base de datos (ver Figura 7).

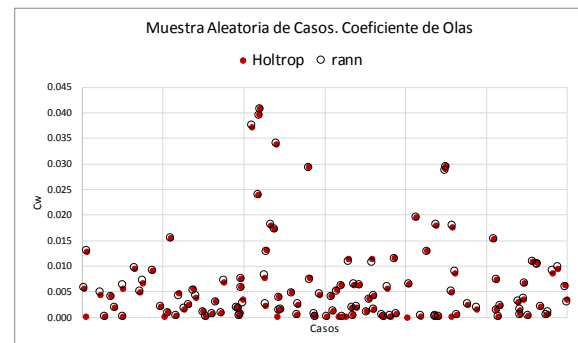


Figura 7: Histograma de error. C_w

5.3 Estimación de la resistencia de tres casos aleatorios

Se han seleccionado tres casos aleatorios entre la base de datos para comparar las curvas de resistencia. Estos tres casos corresponden a un buque de formas finas (Caso A, $C_b=0.66$) y otros dos buques con formas llenas (Caso B y Caso C, $C_b=0.80$), pero diferentes relaciones L/T y B/T .

En la Figura 8 se presenta la correlación del coeficiente por formación de olas en función del número de Froude, entre la base de datos simulada y la estimación realizada con la red neuronal, para los tres casos.

En la Figura 9 se presenta la correlación entre el valor dimensional de la resistencia total, es decir, la suma entre la resistencia viscosa estimada a partir del factor de forma y la resistencia por formación de olas.

En estas figuras se presenta en línea discontinua la predicción realizada por el método de Holtrop para crear la base de datos de buques simulados, y en puntos los valores obtenidos mediante la red neuronal.

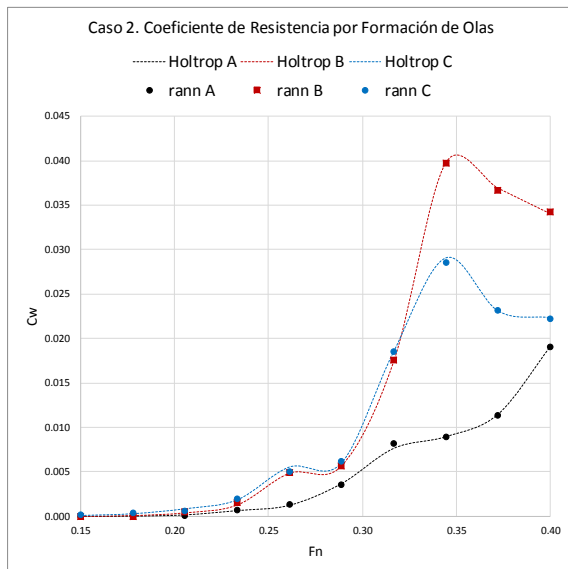


Figura 8: Coeficiente de Resistencia por Formación de Olas

6 CONCLUSIONES

En este artículo se ha analizado la aplicabilidad de las redes neuronales para la estimación de la resistencia al avance de los buques, en las etapas preliminares de proyecto. Para ello se ha creado una base de datos de buques simulados y cuyos coeficientes de resistencia viscosa y por formación de olas se han calculado aplicando el método de Holtrop y Mennen. Esta base de datos se ha utilizado para entrenar una red neuronal y generar una nueva herramienta para la estimación de la resistencia al avance.

Los resultados obtenidos mediante la red neuronal guardan una buena correlación con la base de datos generada, lo que indica un gran potencial de la aplicación de las redes neuronales a este problema.

Es importante la selección de los parámetros de entrada a la red, habiendo sido suficiente para este análisis entre 7 y 8 parámetros que describen las formas del buque. Es de esperar que realizando el mismo ejercicio para datos reales obtenidos de ensayos con modelos se necesiten un mayor número de parámetros de entrada.

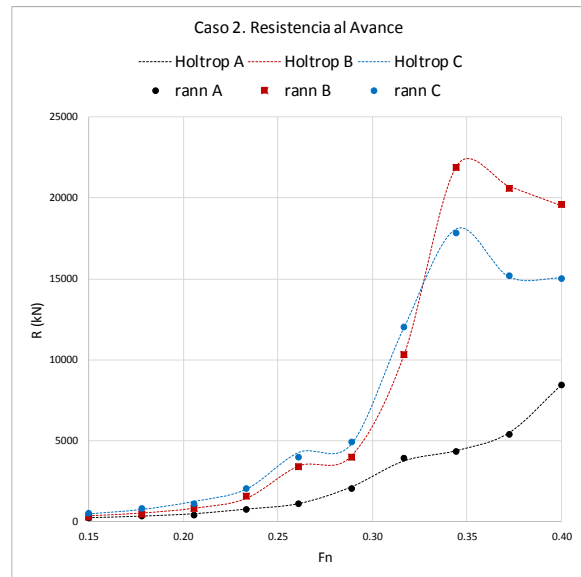


Figura 9: Resistencia por Formación de Olas

Es importante destacar una gran ventaja de las redes neuronales aplicadas a este problema, y es que es fácilmente re-entrenable con nuevos datos experimentales. Además, es relativamente simple generar una arquitectura de neuronas con el software disponible hoy en día.

Una aplicación de estas ventajas, y un posible trabajo futuro, es la posibilidad de re-entrenar la red neuronal con datos experimentales obtenidos en un canal de ensayos hidrodinámicos. Por otro lado, sería de interés añadir variables a la estimación, como podrían ser la influencia del bulbo de proa, y el asiento. Además, sería de interés dividir los datos disponibles en grupos, como por ejemplo por el número de hélices del buque o el tipo de barco (portacontenedores, petrolero, supply, etc).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Red Temática Control Inteligente (DPI2015-71320-REDT), del Ministerio de Economía y Competitividad).

Referencias

- [1] Alvariño, R. Azpíroz, J.J. Meizoso, M. (1997) El proyecto básico del buque mercante, Fondo Editorial de Ingeniería Naval, Colegio Oficial de Ingenieros Navales, Madrid.
- [2] Baquero, A. (2011) Resistencia al Avance del Buque, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, Madrid.

- [3] Canal de Experiencias Hidrodinámicas del Pardo, Madrid. <http://www.cehipar.es/ensayos/>
- [4] Grabowska, K., Szczuko, P., (2015) Ship Resistance Prediction with Artificial Neural Networks, Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA), The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [5] Holtrop, J. Mennen, GGJ., (1982) An Approximate Prediction Formula, Marine Research Institute Netherlands, Países Bajos.
- [6] <http://natureofcode.com/book/chapter-10-neural-networks/>, (Feb. 2017).
- [7] ITTC – Recommended Procedures (2002), Resistance Uncertainty Analysis, Example of Resistance Test, International Towing Tank Conference.
- [8] Larsson L., Hoyte, R. (2010). Principles of Naval Architecture, Ship Resistance and Flow. The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- [9] Neural Network Toolbox, User's Guide, Mathworks. (2016)

Novel Fuzzy Torque Vectoring Controller for Electric Vehicles with per-wheel Motors

Alberto Parra ^a, Martín Dendaluce ^a, Asier Zubizarreta ^b, Joshué Pérez ^a.

^a Tecnia Research & Innovation, Industry and Transport Division, Spain

^b Dept. of Automatics and System Engineering, University of the Basque Country (UPV/EHU)
Faculty of Engineering of Bilbao, Spain

Abstract

The continuous innovation on the electric vehicle area has led to the use of multi-motor powertrain topologies. These powertrains imply new degrees of freedom and better controllability, thus enabling elaborate control solutions for enhanced vehicle dynamics. This allows not only to achieve better vehicle stability, but also greater performance and responsiveness, leading to safer and more satisfying vehicle handling. This work presents a Fuzzy Torque Vectoring Controller for a rear-wheel drive car with independent motors per wheel. The developed design has been validated in a high fidelity vehicle dynamics simulation platform demonstrating its capability to enhance not only curve performance, but also stability.

Keywords: Torque Vectoring (TV), Electric Vehicle (EV), yaw rate, sideslip angle, Fuzzy Logic .

1 INTRODUCTION

The need of reducing global warming, air pollution and oil dependency has motivated not only the implementation of renewable energies, but also other technologies such as electric vehicles [1]. Although these types of vehicles are still not widely established, the sales of vehicles with electrified powertrains (fully-electric as well as hybrids) are increasing, and they have become one of the main research areas in the automotive industry. The integration of electric motors in propulsion systems provide not only better energy efficiency and lower pollution, but also increased controllability, as these motors offer better response time. This enables to achieve enhanced vehicle handling, not only in the longitudinal dynamics, but also in lateral dynamics. The potential of these aspects, together with increased degrees of freedom, are fuelling a notable interest in the field of control engineering.

Electrified propulsion systems offer a wide variety of possible topologies, with a notable diversity of hybrid solutions. Reducing the scope to purely

electric vehicles, as targeted in this paper, the possible topologies can range from a single electric motor with a mechanical differential, to individual motors per wheel. The solutions with individually controllable motors offer the greatest potential for enhancements to the vehicle's dynamic handling. For this purpose, specialized algorithms, such as Torque Vectoring algorithms are used to control the torque on each wheel. These approaches are capable of improving not only the cornering capabilities (such as greater speed, lateral acceleration and overall responsiveness) but also the vehicle stability under certain circumstances.

Several strategies can be used to control the torque distribution in a Torque Vectoring approach, being most of them based on controlling the moment along the vertical axis of the vehicle (yaw moment). For this purpose, three main strategies are used [16]: the first one is based on the distribution of the torque in the rear axle; the second one is using active vehicle roll control systems to vary the lateral load distribution; finally, the third strategy consists in implementing a steering system in both axles. This work focuses on torque distribution strategies, as a rear-wheel drive vehicle has been selected as study case.

The torque distribution approaches have been implemented using a wide variety of control algorithms. Classical PID approaches have been analyzed in [6], where a very detailed comparison is made between two conventional controllers (traditional PID and adaptive PID) and more innovative controllers (sub-optimal Second Order Sliding Mode (SOSM) controller and twisting SOSM controller). The obtained results allow to deduce that no gain scheduling is necessary to achieve good performance. Furthermore, a better tracking in steady state is achieved for the suboptimal sliding mode approach but undesirable oscillations appear in the yaw rate during step maneuvers at high steering amplitudes. In conclusion, predictable behaviour and good frequency response are key characteristics in favour of PID controllers for real vehicle applications.

Other authors have proposed using advanced control approaches such as MPC [17] or integral

sliding mode control [9]. Although these strategies provide good results, the computational cost of these approaches is higher than simpler approaches such as the PID-based ones.

Finally, some authors have proposed to use intelligent approaches, such as Neural Networks [10] or Fuzzy logic systems [11], demonstrating, though several manoeuvres, how torque vectoring improves vehicle's handling, stability and path-following. In addition, the use of a fuzzy logic controller provides good results at low computational cost in comparison with previous approaches, being a good alternative to the implementation of torque distribution approaches.

Due to this, in this paper a novel Torque Vectoring algorithm based on fuzzy logic is proposed. The proposed approach provides enhanced lateral dynamic performance by reducing the sideslip angle and controlling the yaw moment at the same time. The approach has been validated in a rear-wheel driven vehicle implemented on a high fidelity dynamics simulator.

The rest of the paper is divided as follows. In section 2 the mathematical model for the generation of the reference variable for the developed fuzzy controller is explained. Section 3 describes the followed process for the design of this controller, which will be validated through the platform described in section 4 by comparing the fuzzy controller and a vehicle without this control system. Finally, the section 5 summarizes the most important ideas and future work.

2 YAW RATE REFERENCE GENERATOR

The developed torque distribution control approach is based on the control of the yaw moment of the vehicle, so that an appropriate yaw rate reference is required for proper performance of the controller. This section provides a detailed description of the model used for the yaw rate reference calculation in the controller. It must be noted that this model of reduced complexity is exclusively used for real-time execution inside the controller.

For the calculation of the desired yaw rate reference, the model known as "bicycle model" will be used (see Fig. 1), which provides a good balance between accuracy and computational cost. Some additional simplifications are done for the sake of computational performance: the center of gravity is assumed to be at a height of zero; the variation of the vertical force of each tire will not be taken into account; small slip angles assumption

will be considered, so that $\sin(\beta) = \beta$ and $\cos(\beta) = 1$ (linear region); and the coefficient of lateral stiffness of the tire will be constant, defined by the ratio of the lateral force to the slip angle.

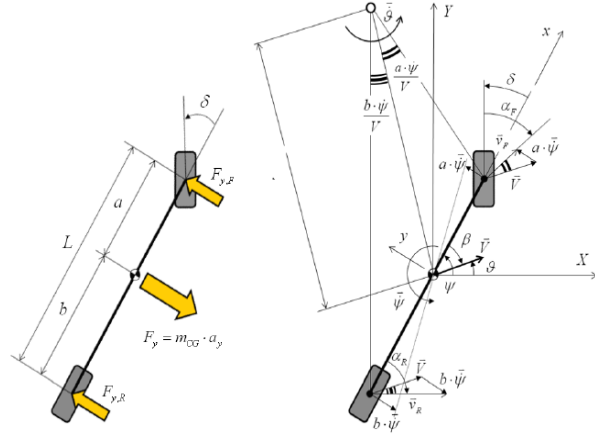


Figure 1: Bicycle model [13].

So, the desired yaw rate is given by the following equation:

$$\dot{\psi} = \frac{V}{L + \frac{m}{L} \left(\frac{b}{C_{\alpha F}} - \frac{a}{C_{\alpha R}} \right) V^2} \delta \quad (1)$$

where a and b are the distance to the centre of gravity of the front and rear axle respectively, δ is the angle of rotation of the front wheels, L is the total distance between axles, m is the total mass of the vehicle located in the center of gravity, V is the vehicle speed and $C_{\alpha F}$ and $C_{\alpha R}$ are the lateral stiffness coefficients of the front and rear wheels, respectively.

However, for safety reasons it will be necessary to limit the value of the yaw rate reference generated. In this case, the limit has been set as follows [6].

$$|\dot{\psi}_{ref,max}| = \left| \frac{a_y}{V} \right| \quad (2)$$

The yaw moment of the vehicle, for an F_x , is calculated as follows [6],

$$M_{z,Rear} = F_{x,RR} \frac{t_r}{2} + F_{x,RL} \frac{t_r}{2} \quad (3)$$

$$F_{x,RL} = F_{x,RR} = F_{x,R} \quad (4)$$

$$F_{x,R} = \frac{M_{z,Rear}}{t_r} \quad (5)$$

Finally, the maximum moment in the vertical axis of the vehicle that can be generated, taking into

account that the maximum torque that can transmit each tire is 2450 Nm.

$$M_{z,max} = F_{x,R,max} t_r = 2722 \text{ N m} \quad (6)$$

3 FUZZY LOGIC CONTROLLER

In this section a novel fuzzy controller whose objective is to control the yaw moment of the vehicle based on the yaw rate reference described in the previous section is presented. The proposed approach allows to increase and ensure the stability of the vehicle, in addition to improve its handling. Furthermore, the proposed approach, with its Multiple Input Multiple Output (MIMO) structure allows also to reduce the sideslip angle, so that both yaw rate and side slip are controlled, increasing the lateral dynamics performance of the vehicle.

3.1 Fuzzy Logic

Fuzzy logic is an extension of Boolean logic by Lot Zadeh in 1965 [19] based on the mathematical theory of fuzzy sets. By introducing the notion of degree in the verification of a condition, fuzzy logic provides a very valuable flexibility for reasoning [5].

The most common fuzzy logic systems structure is shown in Fig. 2. First a fuzzyfication process must be carried out to transform the input data into fuzzy sets. Second, the data is processed with an inference system, based on the developed rules. Finally, as the real world is continuous, a defuzzification method is necessary in order to convert the result given by the inference system into the exact value to, in our case, ensure a appropriated control.

A very important characteristic of fuzzy logic is that the rules are set in natural language in order to formalize human reasoning. In addition, the whole system is based on the designer's knowledge.

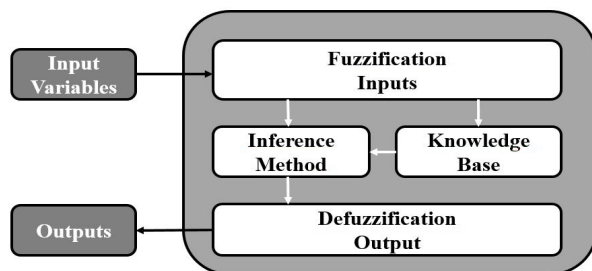


Figure 2: Fuzzy system general scheme

3.2 Fuzzy Controller Design

The proposed Torque Vectoring controller calculates the torque percentage to be subtracted and added to each rear motor (left or right) to perform the torque distribution in the rear axle. This is, if the driver asks for a given torque τ , depending on the yaw rate and side slip angle, the controller calculates a compensation torque percentage τ_c so that $\tau_{left} = \tau + \tau_c$ and $\tau_{right} = \tau - \tau_c$.

For that purpose the controller requires three inputs: the yaw rate error, its derivative and the side slip angle error. The yaw rate error and its derivative are calculated considering the reference detailed in the previous section. The slip angle error is calculated considering that the reference sideslip angle of the vehicle will be zero, in order to reduce the real value and obtain a neutral handling.

One of the most advantages of Fuzzy Logic is the model's abstraction at the time of tuning. This way, a distribution of 5 membership functions has been chosen for the yaw rate, $e(\psi)$, and lateral slip angle, $e(\beta)$ and three membership functions for the input of the derivative of yaw rate error. The membership functions have been selected as trapezoidal and triangular, as they provide computationally efficient calculations maintaining acceptable smoothness on the response, suitable to be implemented in conventional automotive ECUs. On the other hand, for the output, a more extensive distribution of membership functions has been chosen, nine in this case, aiming to achieve a response as close and smooth as possible.

The structure of the developed fuzzy controller is shown in Fig. 3 with the membership functions.

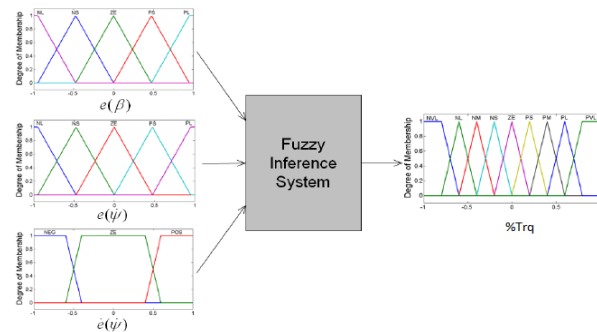


Figure 3: Fuzzy Logic Controller proposed

Subsequently the corresponding rules have been implemented based on the knowledge about the system. Table 1 shows the names and description of the membership functions, while Tables 2-4 show the implemented rules.

The control surfaces obtained are shown in Figs.

Table 1: Membership Functions Names.

Names	Description
NVL	NEGATIVE VERY LARGE
NL	NEGATIVE LARGE
NM	NEGATIVE MEDIUM
NS	NEGATIVE SMALL
ZE	ZERO
PS	POSITIVE SMALL
PM	POSITIVE MEDIUM
PL	POSITIVE LARGE
PVL	POSITIVE VERY LARGE

Table 2: Rules for negative yaw rate error derivative

$\dot{e}(\psi) < 0$	$e(\psi)$					
	NL	NS	ZE	PS	PL	
$e(\beta)$	NL	ZE	NS	NM	NVL	NVL
	NS	ZE	ZE	NS	NL	NVL
	ZE	ZE	ZE	ZE	NS	NL
	PS	PS	PS	ZE	ZE	NS
	PL	PM	PS	PS	ZE	ZE

Table 3: Rules for zero yaw rate error derivative

$\dot{e}(\psi) = 0$	$e(\psi)$					
	NL	NS	ZE	PS	PL	
$e(\beta)$	NL	ZE	ZE	NM	NL	NVL
	NS	PS	ZE	NS	NM	NL
	ZE	PM	PS	ZE	NS	NM
	PS	PL	PM	PS	ZE	NS
	PL	PVL	PL	PM	ZE	ZE

Table 4: Rules for positive yaw rate error derivative

$\dot{e}(\psi) > 0$	$e(\psi)$					
	NL	NS	ZE	PS	PL	
$e(\beta)$	NL	ZE	ZE	NS	NS	NM
	NS	PS	ZE	ZE	NS	NS
	ZE	PL	PS	ZE	ZE	ZE
	PS	PVL	PL	PS	ZE	ZE
	PL	PVL	PVL	PM	PS	ZE

4 and 5. The resulting shape of each surface is uniform providing the desired smoothness in the response, in order to achieve better vehicle stability.

4 VALIDATION

For the validation of the proposed algorithm a commercial vehicle dynamics simulation platform, Dynacar, provided by Tecnalia Research & Innovation, has been used [8]. This tool uses an accurate multibody formulation [2], permits the set

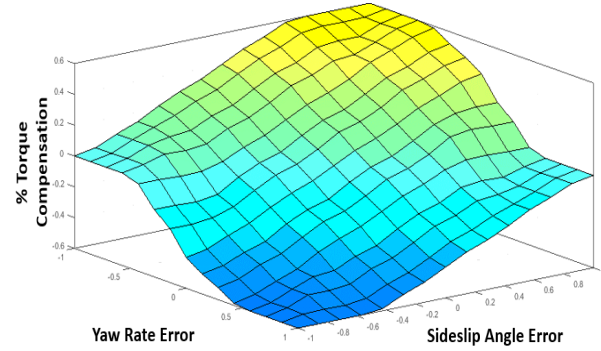


Figure 4: Control surface

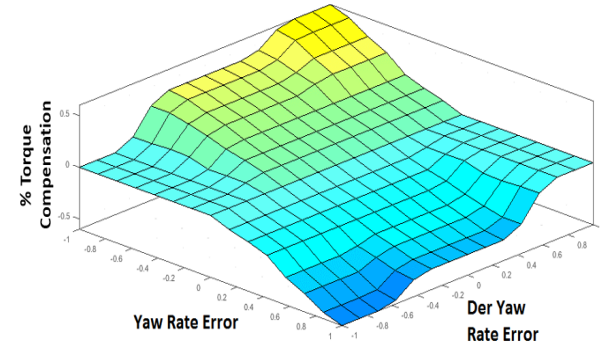


Figure 5: Control surface

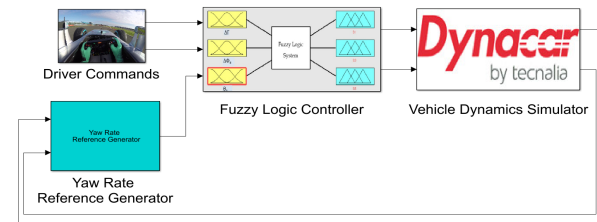


Figure 6: System general scheme

up of different MiL and HiL frameworks for accelerated time and real time simulations and has also been involved in race-track validation activities [4] [14]. The multibody model is integrated in the Matlab-Simulink framework as C-Code in an S-Function running at a sampling time of 1ms. Tires are modeled using an implementation of the Pacejka "Magic Formula" model, extensively used by most car manufacturers as an industry standard for vehicle model simulations [13].

The simulated vehicle is a Class E type with two independently controlled electric motors in the rear axle, which are able to provide each a power of 200 kW and 2450 Nm at the wheel (after the reduction gearing).

The following table summarizes the principal char-

acteristics of the vehicle.

Table 5: Vehicle Principal Characteristics.

Mass [kg]	1830
I_x [kgm^2]	928.1
I_y [kgm^2]	2788.5
I_z [kgm^2]	3234.0
Wheelbase [m]	3.05
Front Axis Track [m]	1.6
Rear Axis Track [m]	1.6

The proposed simulation setup is detailed in Fig. 6. In order to test the previously presented control approach, a set of steering and torque commands have been programmed on the simulator, and the performance of the vehicle has been analyzed in two tests: constant curve trajectory and single lane change. Results for each will be analyzed next.

4.1 CONSTANT CURVE TRAJECTORY

In this test, a constant steering input of 45 degrees is applied while the vehicle keeps accelerating 0 km/h to 80 km/h with a constant torque request of 1500 Nm to both wheels in total. The simulation results for both cases (with and without torque vectoring) are shown in Fig. 7 to 10. Fig. 7 shows the trajectory of the vehicle. Fig. 8 shows the motor torques applied in both cases (without torque vectoring, same torque for both). Figs. 9 and 10 show the yaw rate and the lateral acceleration for each case, respectively.

The trajectory shows that the vehicle is able to better stay in the curve as speed increases, meaning that the understeering behaviour of the vehicle, which can be identified with this test, is clearly reduced. This is also reflected in the higher lateral acceleration and yaw-rate in Figs. 9 and 10, which shows higher values and is close to the theoretical values.

4.2 SINGLE LANE CHANGE

The second test consists of an evasive manoeuvre, notably more aggressive -and critical for the stability- than the previous one. A sine wave input of 45 degrees (Fig. 11) is applied while the vehicle is accelerating with a constant torque reference. The plots and legends follow the same logic as for the previous test, besides the steering wheel input in Fig. 11 and sideslip angle in Fig. 15. Fig. 12 shows the trajectory, Fig. 13 the yaw rate and Fig. 14 lateral acceleration.

In this test, there is a major difference in what

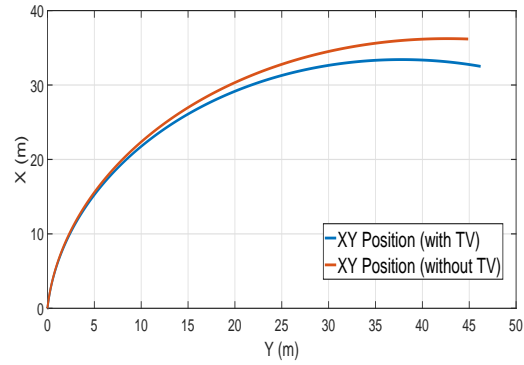


Figure 7: Trajectory

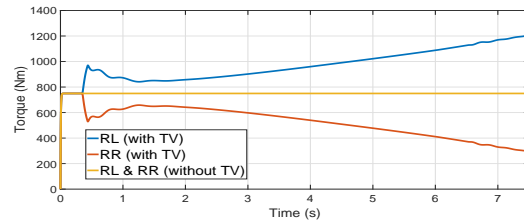


Figure 8: Wheel Torques

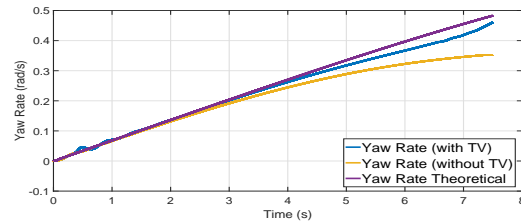


Figure 9: Yaw Rate

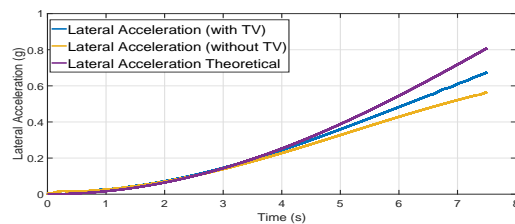


Figure 10: Lateral Acceleration

respects to the trajectory. The vehicle without torque vectoring oversteers as its rear end slides away and the vehicle ends up sliding towards the contrary side. In other words, the vehicle loses stability and it would require the presence of a skilled driver to try to regain the control over the situation. This is also reflected in the lateral acceleration and yaw rate, both reaching excessive magnitudes as the car spins and slides sideways without vectoring (the saturated value of the lateral acceleration can be seen around second 11 in Fig. 13).

This is not the case when the torque vectoring is active. In this case the car is able to follow a neutral trajectory without losing stability, even without a driver closing the loop. This means that the fuzzy control strategy is working correctly. It is able to generate some additional yaw rate and acceleration in the first turn, meaning that it will make a sharper turn, closer to the ideal path, without understeer, similarly to the first test. But in the second part of the manoeuvre, when it needs to turn in the opposite direction, the car tends to reach excessive yaw rate. As the fuzzy torque vectoring controller determines the theoretical yaw-rate internally, it takes action to follow this internal reference avoiding excessive yaw-rate while also minimizing the slip angle.

In other words, the fuzzy torque vectoring controller is able to tackle understeer in the first steering wheel movement, and then control the oversteer in the second steering movement, which otherwise leads to a dangerous stability loss.

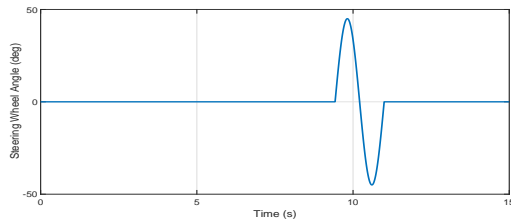


Figure 11: Steering wheel input

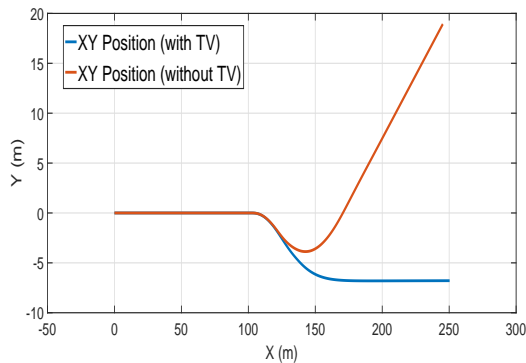


Figure 12: Trajectory

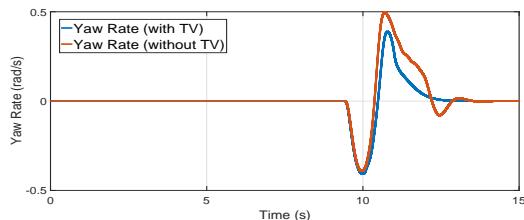


Figure 13: Yaw Rate

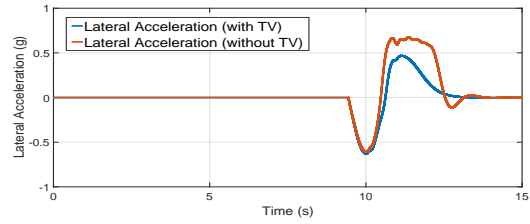


Figure 14: Lateral Acceleration

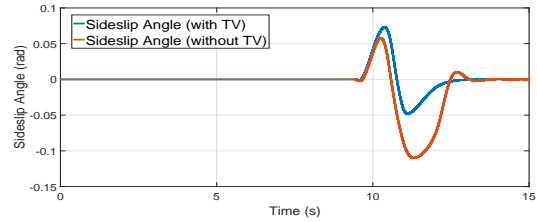


Figure 15: Sideslip angle

5 CONCLUSIONS

This paper has presented a novel Fuzzy Torque Vectoring Controller, for a vehicle with independent rear-wheel motors, with the objectives of increasing cornering performance while also providing additional stability. The results have been notably satisfactory, as it has shown to fulfill these typically contradictory objectives: it was able to increase the cornering forces (reducing understeer), but also was able to control the oversteer in a situation that, in absence of the controller, leads to loss of stability. This is achieved by tracking two inputs of the Fuzzy algorithm -the yaw rate and the side slip angle- while calculating an ideal yaw-rate reference in real-time.

The developed solution has been validated using a highly representative setup including a multi-body vehicle dynamics simulator, which has been exploited to simulate several test procedures.

In conclusion the controllability and degrees of freedom of independent electric motors on vehicles enable enhanced dynamic handling and offer notable research potential for advanced algorithms.

Future work will include implementing an optimized internal set-point generation, while maintaining real-time execution constraints, combining with the implementation of different estimator solutions in real-time to be used as inputs for the torque vectoring controller resulting in a more elaborate algorithm, considering the implementation in new embedded platforms exploiting its computational capacities.

References

- [1] ACEA, (2016) "European Automobile Manufacturers Association - New passenger car registrations by alternative fuel type in the European Union Q4 2015".
- [2] Cuadrado, J., Vilela, D., Iglesias, I., Martín, A., Peña, A., (2013) "A Multibody Model to Assess the Effect of Automotive Motor In-wheel Configuration on Vehicle Stability and Comfort", *ECCOMAS Multibody Dynamics 2013*.
- [3] Dendaluze, M., Allende, M., Pérez, J., Prieto, P., Martín, A., (2016) "Multi Motor Electric Powertrains: Technological Potential and Implementation of a Model Based Approach" *IECON 2016*.
- [4] Dendaluze, M., Iglesias, I., Martín, A., Prieto, P., Peña, A., (2016) "Race-Track testing of a Torque Vectoring Algorithm on a Motor-in-Wheel Car using a Model-Based Methodology with a HiL and Multibody Simulator Setup", *International Conference on Intelligent Transportation Systems*.
- [5] Deroncourt, F. (2013) "Introduction to fuzzy logic" *Massachusetts Institute of Technology*.
- [6] De Novellis, L., Sorniotti, A., Gruber, P., Pennycot, A., (2014) "Comparison of Feedback Control Techniques for Torque-Vectoring Control of Fully Electric Vehicles" *IEEE Transactions on Vehicular Technology*.
- [7] De Novellis, L., Sorniotti, A., Gruber, P., Shead, L., Ivanov, V., Hoepping, V., (2012) "Torque vectoring for Electric Vehicles with Individually Controlled Motors: State-of-the-Art and Future Developments". *World Electric Vehicle Journal Vol. 5*.
- [8] "Dynacar by Tecnalia." [Online]. Available: <http://www.dynacar.es/en/home.php>.
- [9] Haddoun, A., et al., (2006) "Sliding mode control of EV electric differential system," *Proc. ICEM, Chania, Greece*.
- [10] Haddoun A., M.E.H. Benbouzid, D. Diallo, R. Abdessemed, J. Ghouili, K. Srairi, (2007) "Analysis, Modeling and Neural Network Traction Control of an Electric Vehicle without Differential Gears". *Electric Machines & Drives Conference*.
- [11] Jalali, K., Uchida, T., McPhee, J., and Lambert, S., (2009) "Integrated stability control system for electric vehicles with in-wheel motors using soft computing techniques", *SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems*.
- [12] Kahveci, H., Ibrahi, H., Ekici, M., (2013) "An electronic differential system using fuzzy logic speed controlled in-wheel brushless DC motors", *Power Engineering Energy and Electrical Drives*.
- [13] Pacejka, H.B. "Tyre and Vehicle Dynamics", BH, 2005.
- [14] Peña, A., Iglesias, I., Valera, J.J., Martín, A., "Development and validation of Dynacar RT software, a new integrated solution for design of electric and hybrid vehicles", *EVS 26 (2012)*.
- [15] Shibahata, Y., Shimada K., Tomari T., (1993) "Improvement of Vehicle Maneuverability by Direct Yaw Moment Control", *Vehicle System Dynamics*, pp. 465-481
- [16] Shimada, K., Shibahata, Y. (1994), "Comparison of Three Active Chassis Control Methods for Stabilizing Yaw Moments", *SAE Technical Paper*.
- [17] Siampis, E., Velenis, E., Longo, S., (2015) "Model Predictive Torque Vectoring Control for Electric Vehicles Near the Limits of Handling" *European Control Conference*.
- [18] Wallentowitz, H., (2005) "Vertical and Lateral Dynamics of Passenger Vehicles", *Automotive Technology II, Institute of Automotive Engineering, Aachen University of Technology, Germany*.
- [19] Zadeh, L.. (1965) 'Fuzzy Sets' *Information and Control*.

REPOSTAJE EN TIERRA DE UN AVIÓN MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS

Elías Plaza
eliasplaza@gmail.com

Matilde Santos
Facultad de Informática, Universidad Complutense de Madrid, msantos@ucm.es

Resumen

En este trabajo se presenta una solución alternativa, basada en técnicas de la Inteligencia Artificial, al problema de la gestión de la distribución de combustible dentro de una aeronave comercial. En concreto se ha abordado el repostaje de la aeronave antes de un vuelo. El repostaje en tierra consiste en decidir la cantidad de combustible que se dispondrá en cada depósito atendiendo a criterios de seguridad, estabilidad del avión y eficiencia energética. Para ello se define un problema de optimización cuya función de coste nace del conocimiento específico de los factores que influyen en una aeronave que tiene relación con el posicionamiento del combustible. Después su resolución se realiza mediante Algoritmos Genéticos. Los resultados obtenidos en simulación mejoran la solución manual estándar que se viene aplicando.

Palabras Clave: Algoritmos Genéticos, optimización, repostaje de combustible, arquitectura de los depósitos, aeronave comercial.

1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo se plantea el sistema de control para gestionar la distribución de combustible entre los tanques de un avión comercial real tipo Long Range (por ejemplo un Airbus A330 [1]).

Este tipo de aviones consta de varios depósitos de combustible situados en sus alas (del orden de seis tanques), más un depósito situado en la cola que sirve para balancear el peso del avión y así tener más control sobre el centrado del mismo. Esto tiene gran influencia en la estabilidad del avión así como en su controlabilidad. Por tanto, es necesario disponer de un sistema de control de la distribución de combustible entre los tanques para mantener el centro de gravedad dentro de unos márgenes de seguridad adecuados. Además dicho sistema debe gestionar el combustible de tal forma que los motores siempre queden suministrados correctamente.

Debido a su complejidad, la estrategia de redistribución abarca dos fases. En primer lugar el repostaje de la aeronave antes de un vuelo, y en segundo lugar, la redistribución del combustible entre los tanques durante el vuelo de la aeronave.

El primero de los problemas, el de repostaje en tierra, consiste en decidir la cantidad de combustible que se dispondrá en cada depósito. Para ello se define un problema de optimización cuya función de coste nace del conocimiento específico de los factores que influyen en una aeronave que tiene relación con el posicionamiento del combustible. En este trabajo se presenta una propuesta basada en la técnica heurística evolutiva de los Algoritmos Genéticos para su resolución [7], y se compara con la aproximación manual estándar.

Aunque la literatura sobre este tema es escasa, en el artículo de Turgut [8] se utilizan algoritmos genéticos para analizar la relación entre el consumo de fuel de una aeronave y la altitud de la misma durante la fase de descenso. También hace referencia a un problema similar en el sector aeronáutico el trabajo de Mongeau [5] sobre la optimización de la distribución de la carga de pago en un avión. Sin embargo hay que apuntar que en este caso el problema es discreto ya que el tamaño de contenedor es fijo; además el algoritmo busca maximizar la carga para cada vuelo de entre toda la mercancía a transportar. En nuestro caso la masa de fuel es fija para un vuelo dado, y el problema es continuo ya que la cantidad de combustible en cada tanque estará comprendida entre cero y el máximo que puede acoger el tanque.

La organización de esta contribución es como sigue. En la sección 2 se presentan las especificaciones de la aeronave. En la sección 3 se describe la configuración del algoritmo genético utilizado y la función de coste que define el problema a optimizar. La sección 4 muestra la aplicación al problema concreto y los resultados son presentados y comentados en la sección 5. El trabajo termina con las conclusiones y trabajos futuros.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Como es sabido, justo antes de despegar la aeronave debe repostar. La cantidad de combustible que se debe cargar se determina a partir del plan de vuelo concreto aprobado por la autoridad. Para un determinado plan le corresponderá una carga mínima obligatoria. Básicamente esta carga, además de tener en cuenta la cantidad de combustible que previsiblemente consumirán los motores (más un margen de seguridad), también contiene, o bien la cantidad de combustible necesaria para mantenerse a la espera en hipódromo durante un determinado tiempo antes de tener permiso para aterrizar en el destino, o bien la cantidad necesaria para aterrizar en el aeropuerto alternativo si no es posible hacerlo en el de destino [3].

Tomando como base la arquitectura típica del sistema de combustible de un avión comercial de largo alcance (como el A330-200), se tienen dos depósitos en cada ala, un depósito central en la panza y un depósito en la cola de la aeronave, todos ellos intercomunicados por tuberías (un total de 6 tanques). La distribución de combustible se controla por válvulas y bombas.

Los depósitos 2 y 4 (ver [6]) se denominan *Inner*, ya que se encuentran en la parte más interior de cada semi-ala. Los depósitos 1 y 5 son llamados *Outer*, situándose estos en una zona más alejada del encastre de cada ala. Los depósitos 1 y 2 son simétricos respecto a 4 y 5, a cada lado del plano vertical de simetría del avión. Además, debido a la forma del ala y por conveniencia de la distribución inercial, los depósitos *Inner* son mucho más grandes en capacidad que los *Outer*. El depósito 3 es el denominado *Central*, por estar situado en la panza de la aeronave entre los encastres de las alas. Su capacidad es del mismo orden de magnitud que los *Inner*. Por su parte el depósito 6 es conocido como *Trim Tank* ya que está dispuesto en el interior del estabilizador horizontal de trimado. Su capacidad es bastante menor al *Central* aunque algo mayor que los *Outer*.

Esta tarea de decisión sobre el repostaje se encuentra muy reglada para cada aeronave particular. La cantidad de combustible total a repostar va a ser un dato de entrada para nuestro problema.

Otro dato de entrada es el peso total de la aeronave. A partir de él se calcula el centro de gravedad (CG) objetivo que conviene tener en el eje longitudinal del avión para su maniobrabilidad y el margen de estabilidad, definido por la posición longitudinal máxima y mínima que puede alcanzar el centro de gravedad. Estos tres valores (CG objetivo, CG máximo, CG mínimo) se pueden obtener de funciones que provee el fabricante del avión. Las

usadas en este caso se presentan en las Figuras 1 y 2, generadas con magnitudes de aviones reales [4].

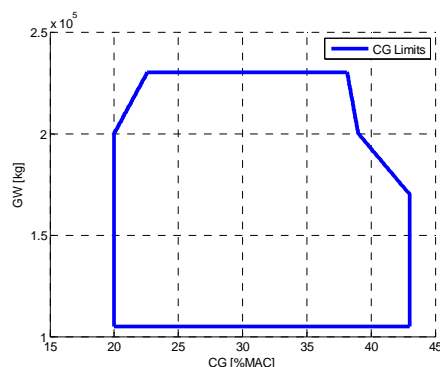


Figura 1: Límites del centro de gravedad en función de la masa total.

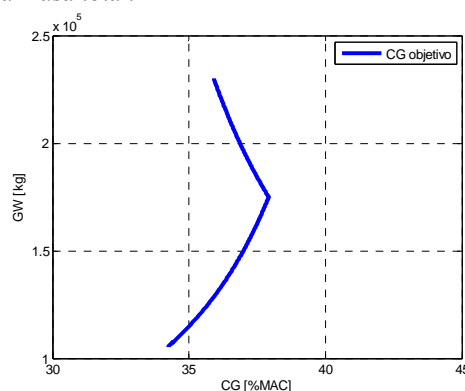


Figura 2: Centro de gravedad objetivo en función de la masa total.

El peso total de la aeronave GW (Gross Weight) viene dado por tres componentes independientes. El primero es fijo: el peso del avión en vacío EW (Empty Weight), dado por todo el conjunto estructural de la aeronave así como la carga de sistemas. Los otros dos son variables. Uno de ellos es la carga de pago del avión MP (Mass Payload), formada por tripulación, pasaje, equipaje y mercancía. La suma de la carga de EW más MP da lugar al peso sin fuel de la aeronave, ZFW (Zero Fuel Weight). El tercer conjunto es la cantidad de combustible, MF (Mass Fuel).

$$\begin{aligned} GW(kg) &= ZFW(kg) + MF(kg) \\ ZFW(kg) &= EW(kg) + MP(kg) \end{aligned} \quad (1)$$

Además diferenciamos la masa prevista para consumo, porque no toda la masa cargada se consumirá; siempre se llevan reservas que permitan llegar a un aeropuerto alternativo en caso de emergencia o mantenerse en hipódromo. Esta masa será de interés por su influencia en la seguridad operacional así que será otro dato de entrada más a nuestro problema.

La operación de repostaje consiste en distribuir la cantidad total de fuel entre los tanques. Cada compañía elige una forma de llevar a cabo esta operación durante la fase de pre-vuelo. Este orden está estudiado para mantener un llenado lógico y que mantenga el CG dentro de la envolvente si la carga de pago también se ha colocado correctamente. Sin embargo no optimiza la distribución. La distribución manual que habitualmente se utiliza, además de poder incurrir en errores humanos, resulta más lenta que si la automatizamos con alguna técnica como los algoritmos evolutivos. Además el problema de colocación de la carga de pago pasa a ser menos exigente, ya que cierto error en la colocación de la carga puede suplirse con la distribución del fuel.

3 RESTRICCIONES Y FUNCIÓN DE COSTE

El objetivo de la optimización es distribuir la carga de fuel de un avión entre los tanques haciendo que el centro de gravedad quede dentro de los límites de estabilidad y lo más cerca posible del CG objetivo. Para ello se va a definir una función de coste a minimizar. Los componentes o costes de esta función vienen dados por los siguientes criterios:

- *Coste 1*: la distancia entre el centro de gravedad resultante y el objetivo debe ser mínima (2).

$$C1 = |X_{cg_obj} - X_{cg}| + |Y_{cg_obj} - Y_{cg}| + |Z_{cg_obj} - Z_{cg}| \quad (2)$$

Donde el CG objetivo viene determinado por la masa total (ZFW+MF), y el CG de la aeronave se calcula aplicando la ley de masas (3).

$$\overline{CG} = \frac{ZFW \cdot \overline{CG}_{zfw} + \sum_{i=1}^6 (\overline{CG}_{dep_i} \cdot M_i)}{ZFW + \sum_{i=1}^6 (M_i)} \quad (3)$$

con CG_{dep_i} la posición del centro de gravedad y M_i la masa de cada depósito de combustible.

- *Coste 2*: la diferencia entre la cantidad de combustible cargada en los tanques que abastecen los motores y el combustible que previsiblemente consumirán durante el vuelo. Esto tiene como objetivo la seguridad operacional y minimizar la cantidad de fuel que habrá que redistribuir en vuelo, lo que reduce el gasto energético de las bombas (4).

$$C2 = (M_{eng1} / 2 - M_2 + M_{eng2} / 2 - M_4) / MF \quad (4)$$

Donde M_{eng} es la masa prevista para el consumo de los motores (kg), M_2 es la masa de combustible en el tanque "2" (kg) y M_4 la del "4" (kg), la de los *Inner*.

- *Coste 3*: la inversa de la diferencia entre la cantidad de fuel cargada en cada depósito frente a la crítica. Se trata de minimizar el desplazamiento del CG durante el despegue debido a la inercia que tiene el líquido a ir hacia atrás por la aceleración. Para cada depósito existe una cantidad de combustible para la cual el desplazamiento de CG es máximo dada una aceleración, cantidad que llamaremos masa crítica.

Para construir este coste se ha recurrido a una función definida a tramos para cada tanque. Dicha función vale "1" para el rango de masas en que el desplazamiento es máximo durante la operación de despegue. Fuera de ese rango se interpola hasta el valor de la función "0" en los puntos en que el desplazamiento es mínimo.

Dependiendo del avión las curvas del desplazamiento del centro de gravedad respecto a la carga de fuel en cada tanque es distinto. En la Figura 3 se presentan los correspondientes a órdenes de magnitud de aviones como el considerado en este trabajo.

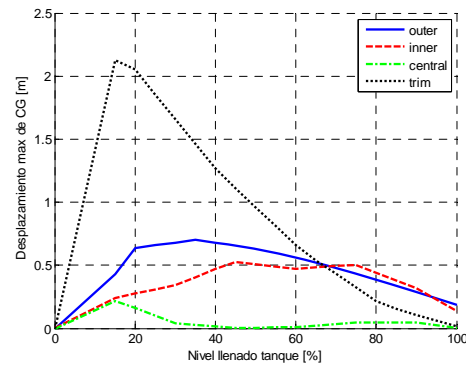


Figura 3: Desplazamiento máximo del CG para un porcentaje de llenado durante un despegue típico.

En base a esta gráfica se obtienen las funciones que dan lugar a este coste, con $\mu = M_i / M_{max_i} \cdot 100$, porcentaje de llenado de cada tanque. A modo de ejemplo se muestra en (5) la del tanque central.

$$f_{central} = \begin{cases} 1, & si \{ \mu > 10 \parallel \mu < 20 \} \\ 1 - \frac{10 - \mu}{10}, & si \{ \mu \leq 10 \} \\ 1 + \frac{20 - \mu}{80}, & si \{ \mu \geq 20 \} \end{cases} \quad (5)$$

$$C3 = f_{central} + 2 \cdot f_{inner} + f_{outer} + f_{trim}$$

- *Coste 4*: la cantidad de fuel cargada en los depósitos que no tienen tomas de repostaje (tanques internos). Se trata de minimizar el tiempo de repostaje, y por tanto el tiempo que el avión debe permanecer en tierra. Se debe tener en cuenta la cantidad que ya está cargada en el avión inicialmente (6).

$$C4 = (100M_1 + M_2 + 50M_3 + M_4 + 100M_5 + 1000M_6) / MF \quad (6)$$

- *Coste 5*: la diferencia entre las cantidades de combustibles cargadas en cada depósito para realizar la distribución lo más homogénea posible y así repartir el peso a lo largo del ala. Aunque no es crítico, a la larga disminuiría la fatiga del ala.

$$C5 = (|M_1 - M_2| + |M_4 - M_5|) / MF \quad (7)$$

La función de coste vendrá definida por la suma de esos costes, que dependen de las masas de los depósitos y datos de entrada al problema, multiplicados cada uno por un peso según su prioridad. La sintonía de esos costes se basa en la experiencia acerca del problema.

$$C(ZFW, M_{eng}, M_i) = P_1 \cdot C1(ZFW, M_i) + P_2 \cdot C2(M_{eng}, M_i) + P_3 \cdot C3(M_i) + P_4 \cdot C4(M_i) + P_5 \cdot C5(M_i)$$

Es importante observar que algunos de los costes siguen criterios contrarios entre ellos. Por ejemplo, el coste C2 obtiene su mínimo cuando la masa de fuel en los depósitos *Inner* iguala a la prevista para el consumo en el vuelo. Sin embargo, el coste C5 es mínimo cuando las masas *Inner* y *Outer* son iguales (hay que recordar que la masa máxima posible en los *Outer* es muy baja). Como las soluciones pueden ser múltiples, se buscan estos pesos para llegar a la mejor solución de compromiso basada en la experiencia. De esta manera se ha decidido dar más peso a C1 y C2 frente a los demás, y el peso más pequeño a C5.

La minimización de la función de coste está supeditada a las siguientes restricciones:

- *Restricción 1*: no superar el volumen máximo de cada depósito.

$$R1: M_i \leq M_{\max_i} \quad (9)$$

- *Restricción 2*: no permitir masas negativas.

$$R2: M_i \geq 0.0 \quad (10)$$

- *Restricción 3*: no salir del rango válido del centro de gravedad impuesto (11).

$$R3: X_{CG\min}(ZFW + MF) \leq X_{CG} \leq X_{CG\max}(ZFW + MF)$$

- *Restricción 4*: mínima cantidad de combustible obligatoria.

$$R4: \sum_{i=1}^6 M_i \geq MF \quad (12)$$

- *Restricción 5*: dejar espacio libre suficiente en el *Trim Tank* para retrasar el CG durante el vuelo, siendo η un porcentaje de la masa máxima de este tanque prefijado en base a la experiencia sobre el retraso del CG necesario durante un vuelo.

$$R5: M_6 \leq \eta M_{\max_6} \quad (13)$$

4 APLICACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO

El repostaje en tierra tiene una doble vertiente: la resolución del problema de optimización y la sintonización de la función objetivo (los pesos).

El vector de decisión es la cantidad de fuel que hay que introducir en cada depósito. Lo más directo es elegir la masa como magnitud de esta cantidad. Tenemos seis depósitos, así que tendremos un vector de decisión de seis componentes ordenadas según el número que identifica cada depósito.

$$v_{decision} = [M1 \ M2 \ M3 \ M4 \ M5 \ M6]$$

Dado que la suma de las cantidades de cada depósito debe ser la masa total de fuel que se ha determinado para la operación de la aeronave, la sexta componente es la diferencia entre la masa total (dato) y la suma del resto de componentes. Hemos decidido que esta componente sea el tanque central (M3) por ser el que tiene mayor tamaño y está más centrado en el avión.

$$V_{individuo} = [M1 \ M2 \ M4 \ M5 \ M6]$$

Las entradas son: masa total de fuel, masa total de la aeronave (para obtener los límites de CG y el CG objetivo), y la masa de fuel prevista para el consumo.

Respecto al algoritmo genético, aunque la configuración la puede determinar el usuario, hemos considerado una población inicial de $N=30$ individuos, de los cuales tomamos $N_p=8$ parejas de padres en cada iteración. Para generar la población inicial hemos considerado varias opciones, por ejemplo, generar de manera aleatoria cada componente del vector individuo, pero puede generar soluciones no factibles. Otra opción es el llenado secuencial de los depósitos, repartiendo la masa total en cascada, y después perturbar cada individuo sumándole una cantidad aleatoria entre 0 y el 10% de la masa máxima del tanque en cuestión. La mayor parte de los individuos son factibles, cumpliendo todas las restricciones, pero la perturbación asimétrica desplaza el CG hacia la izquierda o derecha, algo no deseable. Por lo tanto, se optó por aplicar esta última opción pero con una perturbación simétrica (sumamos lo mismo a los tanques que se encuentran a un lado y al otro del ala).

4.1 OPERADORES GENÉTICOS

Los padres son seleccionados de entre todos los individuos siguiendo el método de la ruleta.

Aunque se han considerado tres versiones del cruce (asimétrico, binario simulado y cruce binario con restricciones), pero se ha optado por la primera por

ser la más sencilla ya que no se obtenía una mejora significativa con las otras tras varios experimentos.

Para la mutación de hijos obtenidos en el cruce hemos considerado mutación uniforme, mutación semi-aleatoria sobre un número aleatorio de componentes (se suma a las componentes a mutar un valor comprendido entre 0 y el 20% de la masa máxima del tanque), y si de forma aleatoria una componente del vector es seleccionada para ser mutada, también se muta el tanque simétrico, que ha resultado la elegida por dar mejores resultados.

En la población de partida se sustituyen los padres elegidos por los hijos resultantes del cruce y mutación de los primeros.

Como criterio de parada se ha establecido un máximo de 5000 iteraciones que son asumibles en tiempo de computación y la convergencia es buena. También se tiene en cuenta para parar la ejecución si la aptitud del mejor individuo de la población no mejora durante 100 iteraciones consecutivas.

5 VALIDACIÓN Y RESULTADOS

El algoritmo diseñado es codificable directamente dentro de la computadora FCMS (Sistema de Control y Monitorización de Fuel) del avión. Los datos necesarios son de dos tipos: fijos, correspondientes a la geometría del avión, y los variables, correspondientes a los parámetros de entrada (ZFW, CG, M_{eng}), que provienen de la conexión digital ARINC-429 de otra computadora (el FMGC, encargada de la gestión del plan de vuelo). La solución del problema son las masas de combustible en cada tanque. Una vez se tienen estos valores, el FCMS se encarga de abrir las válvulas de paso de cada tanque y bombear el combustible a cada tanque hasta alcanzar dichas masas.

El tiempo de resolución no puede ser mayor de 5 minutos ya que la fase de pre-vuelo se puede ver afectada por retrasos.

5.1 ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN

Partimos de una solución lejana a los óptimos y además no factible, por ejemplo:

$$v_{individuo}|_{inic} [2865, 0, 0, 2865, 40000]$$

Hemos considerado en este escenario que la aeronave repostará 75000 kg de combustible, con una carga de pago de 10000 kg, situándose el CG con ZFW a 0.4 m por detrás del punto de referencia, borde de ataque del MAC (cuerda media aerodinámica). Con esto, el vector de decisión inicial sería:

$$v_{decision}|_{inic} = \begin{bmatrix} 2865 \\ 0 \\ 75000 - 2865 - 2865 - 40000 \\ 0 \\ 2865 \\ 40000 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2865 \\ 0 \\ 29270 \\ 0 \\ 2865 \\ 40000 \end{bmatrix}$$

Es decir, no cargamos los tanques *Inner*, cargamos los tanques *Outer* al máximo, el *Central* casi al completo también, y el *Trim Tank* muy por encima de su capacidad. Evidentemente esta solución no es factible (R1). Además la posición del CG también está fuera del margen de estabilidad, situándose muy por detrás del límite situado para la configuración de este escenario (7 m del origen).

Aplicando el algoritmo, la evolución de los costes para el mejor individuo de la población en cada iteración se muestra en la Figura 4. Observamos que el algoritmo enseguida tiende a generar soluciones factibles y a empezar a disminuir los costes, sobre todo de aquellos que más peso tienen en la función criterio como es la posición del CG. Por otra parte, se observa también como una vez encontrada una solución bastante aceptable (a partir de la iteración 200 aproximadamente), ya es muy difícil mejorar al individuo encontrado.

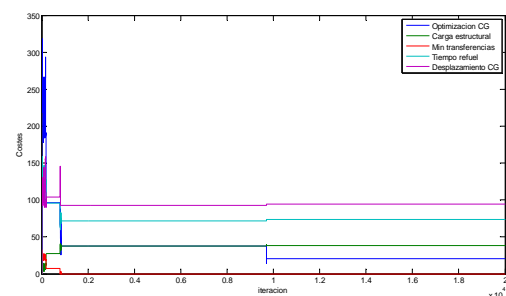


Figura 4: Evolución de los costes para cada variable.

La Figura 5 muestra la evolución de la aptitud máxima de la población en cada iteración. En las primeras iteraciones es nula, debido a que dichos individuos no son solución factible. En el momento que se encuentra un individuo factible se produce un salto en la aptitud. A partir de aquí el algoritmo trata de encontrar una mejor mediante cruce y mutación.

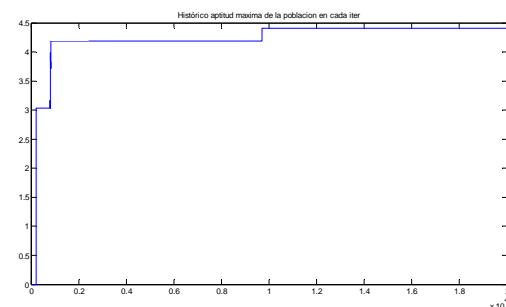


Figura 5: Aptitud del mejor individuo.

Es evidente que en nuestro diseño prima la optimización de la posición longitudinal del CG, lo que se hace evidente si presentamos la evolución del CG del mejor individuo en cada iteración (Figura 6).

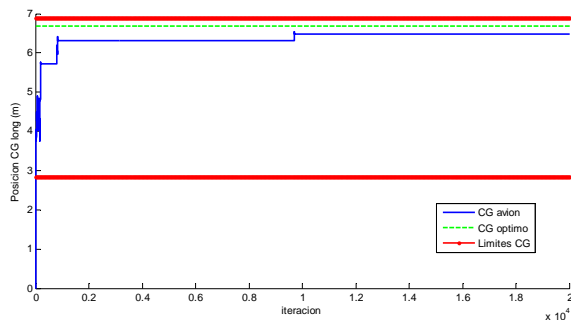


Figura 6: Evolución del CG del fuel.

El CG tiende al óptimo pero sin llegar a alcanzarlo ya que los demás costes lo impiden. Nótese que el CG inicial es nulo, debido a que en la primera iteración ya se ha perturbado la solución inicial.

5.2 DETERMINACIÓN DE LOS PESOS

Se trata de un problema con varios objetivos que deben cumplirse, cada uno de ellos con un coste asociado que se debe determinar, ya que la función de coste es la suma ponderada de todos ellos. Por ejemplo, si damos pesos muy grandes al posicionamiento del CG, la solución convergerá a una distribución del fuel cercana al CG óptimo, sin tener en cuenta los otros costes que pueden no alcanzar buenas soluciones (Figura 7).

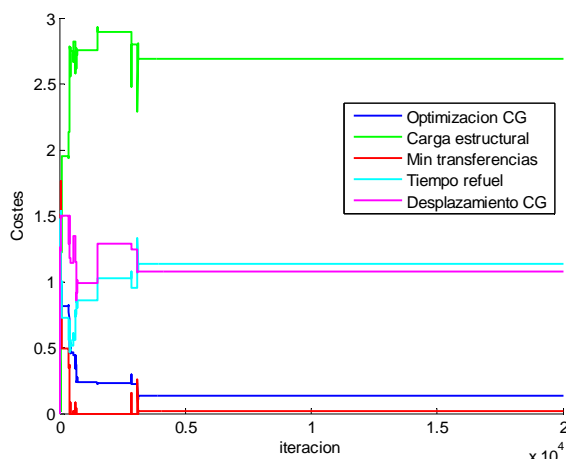


Figura 7: Evolución de los costes asociados al mejor individuo para los pesos $P = [100 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$.

En la Figura 8 se muestra la evolución del CG del mejor individuo. Efectivamente el CG está muy cerca del CG óptimo, a unos 30 cm de él.

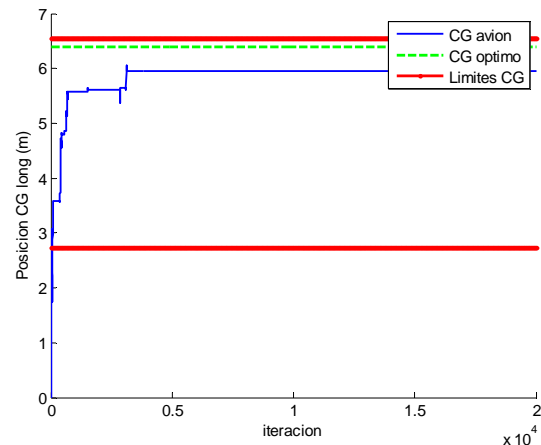


Figura 8: Evolución del CG del fuel completo para una distribución de pesos $P = [100 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$.

Si en vez de dar tanto peso al posicionamiento del CG se lo damos a otras variables como, por ejemplo, a la minimización del tiempo de transferencia durante el repostaje y a las transferencias durante el vuelo, podemos observar cómo el comportamiento varía bastante respecto al anterior (Figura 9).

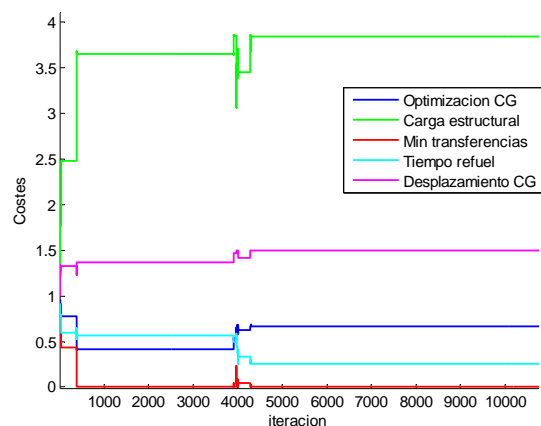


Figura 9: Evolución de los costes asociados al mejor individuo para los pesos $P = [1 \ 1 \ 100 \ 100 \ 1]$.

El algoritmo disminuye esos dos factores, y la evolución del CG no tiende a converger al óptimo.

Por otra parte, si igualamos todos los costes, el algoritmo tenderá a minimizar unos costes frente a otros de manera indistinta, con lo que las soluciones del algoritmo serán dispares y no tendrá mucho sentido. Por ello conviene jerarquizar los costes para que haya una tendencia hacia lo que mejora de manera global la solución basándonos en el conocimiento cualitativo del experto.

En nuestro caso se ha premiado ante todo el posicionamiento del CG porque es el principal objetivo de diseño del control. El segundo criterio prioritario ha sido intentar disminuir las transferencias durante el vuelo; esto es, introducir en

los tanques *Inner* la masa de fuel más cercana posible a la que previsiblemente consumirán los motores en el vuelo concreto. Esto es importante ya que, ante un fallo total del sistema de transferencia de combustible, los motores no tendrían problema en seguir siendo alimentados. Por ello finalmente se ha optado por el siguiente reparto:

$$P = \begin{bmatrix} PosicionCG \\ CargaEstructural \\ TransferenciasFuel \\ TiempoRepostaje \\ DesplazamientoCG \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 100 \\ 70 \\ 90 \\ 60 \\ 80 \end{bmatrix}$$

5.3 COMPARACIÓN CON LA SOLUCIÓN CLÁSICA

Una cuestión importante es si se mejora la solución que se toma habitualmente en el sector aeronáutico, es decir, el llenado jerárquico de unos tanques concretos hasta cierta cantidad, después otros, y así sucesivamente hasta llegar a introducir toda la masa prevista.

Ejecutamos el algoritmo tomando como solución inicial la clásica, considerando el escenario de 65000 kg de combustible, carga de pago de 10000 kg y situándose el CG del avión para ZFW 0.4 m por detrás del punto de referencia. Se considera que el 80% del combustible será consumido por los motores durante el vuelo normal. La evolución de los costes se muestra en la Figura 10.

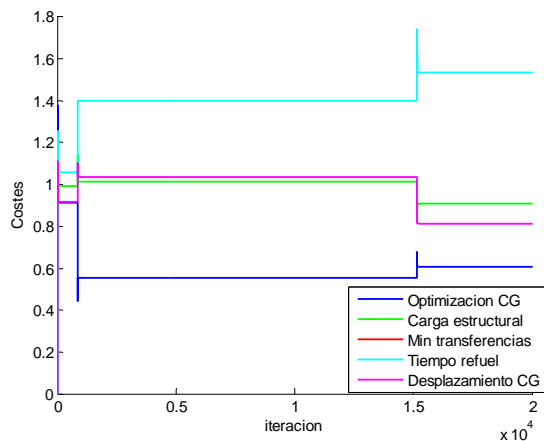


Figura 10: Evolución de los costes asociados al mejor individuo en cada iteración para los pesos.

Observamos como el coste asociado al CG es de los más premiados en el sentido que el algoritmo tiende a disminuirlo rápidamente. Si presentamos la gráfica de su evolución podemos ver que efectivamente la solución es bastante aceptable, con el CG situado en los márgenes y cerca del óptimo (Figura 11).

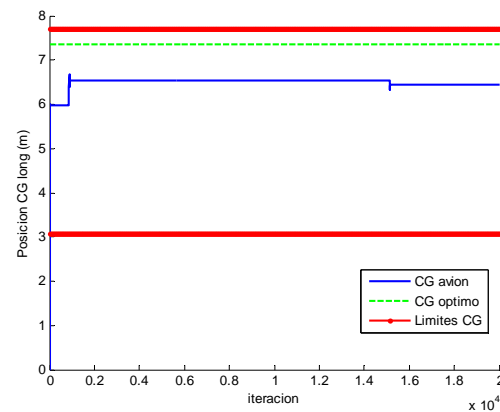


Figura 11: Evolución del CG del fuel para el individuo mejor de cada iteración.

La minimización de transferencias no se observa en la gráfica de los costes pues está con coste “0” todo el rato. Eso es debido a que desde un principio más del 80% de la masa del fuel se encuentra en los tanques *Inner*, por lo que el coste de las transferencias es menor. El algoritmo ha premiado las soluciones en las que al menos esa cantidad de fuel permanece en los *Inner*.

También tiene una clara influencia la minimización del desplazamiento del CG durante el despegue en cada tanque. En las primeras iteraciones el algoritmo encuentra una solución en la que se tiene un CG mejor posicionado a costa de aumentar el desplazamiento de éste durante el despegue. Sin embargo, al evolucionar, se llega a encontrar una solución aún mejor en la que con un leve aumento del coste de la posición del CG se disminuye sustancialmente el coste de su desplazamiento.

El resultado final del algoritmo es el siguiente. Partiendo de una solución inicial de diseño clásica, siguiendo la jerarquía de llenado para 65000 kg de combustible, que es:

$$v_{decision}|_{inic} = [2865, 28435, 0, 28435, 2865, 2400]$$

Donde los dos tanques *Outer* están completos, los *Inner* casi completos (56870 kg, es decir, 2 x 28425 kg.), el *Central* vacío y el *Trim* con lo restante, el CG del combustible queda a 5.7735 m por detrás del origen de referencia. El vector de costes sería:

$$C|_{inic} = \begin{bmatrix} PosicionCG \\ CargaEstructural \\ TransferenciasFuel \\ TiempoRepostaje \\ DesplazamientoCG \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 158.91 \\ 38.55 \\ 0 \\ 46.61 \\ 109.09 \end{bmatrix}$$

La solución final seleccionada por el mecanismo evolutivo es la siguiente:

$$v_{decision}|_{final} = [2852, 25681, 3519, 25681, 2852, 4414]$$

Es decir, respecto a la original, se retira fuel de los *Outer* y de los *Inner* (51362 kg), sin dejar de mantener prácticamente todo el fuel suficiente para los motores durante el vuelo) y se coloca en el *Central* y en el *Trim*. Con esta distribución el CG del combustible queda a 6.4467 metros por detrás del origen de referencia. El vector de costes sería:

$$C|_{final} = \begin{bmatrix} PosicionCG \\ CargaEstructural \\ TransferenciasFuel \\ TiempoRepostaje \\ DesplazamientoCG \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 91.5784 \\ 34.4197 \\ 0.3973 \\ 82.9021 \\ 94.34 \end{bmatrix}$$

El CG objetivo está a 7.25 m del origen, por lo que la solución del AG está bastante más cerca del óptimo que la clásica.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La optimización heurística aplicada asegura que prácticamente todo el fuel que será consumido por los motores se encuentra en los *Inner*. Recordamos que esta cantidad de fuel es del 80% de la original. Es decir, el AG inteligentemente ha sabido retirar toda la cantidad de fuel que sobraba respecto a la que se consumirá por los motores.

Esta cantidad que se retira es utilizada para llenar gran parte del *Trim Tank* de forma que se retrase el CG. Pero también es utilizada, junto con algunos kg de los *Outer*, para llevar fuel al *Central* con dos objetivos: primero, mejorar la homogenización del peso distribuido en las alas (mejora de la carga estructural) y, por otro, mejorar globalmente el desplazamiento del CG durante el despegue.

Por otra parte, la jerarquía de diseño clásica da lugar a una solución bastante buena. Esto es lo esperado, pues es consecuencia del estudio de expertos del tema. El hecho de que no nos separemos mucho de esta solución quiere decir que el diseño de nuestra función objetivo está en la línea del conocimiento experto del problema de repostaje.

Además vale la pena notar que la convergencia del algoritmo a la solución final es buena.

Como trabajos futuros se está abordando el problema de la distribución de combustible durante el vuelo con técnicas inteligentes, en concreto con lógica borrosa. También se propone el plantear una

optimización multiobjetivo, con varios costes simultáneos [2].

Por otro lado, sería interesante validar los resultados de la optimización antes de su aplicación real puesto que el componente aleatorio de esta técnica heurística puede hacer que la solución generada no siempre sea mejor que la tradicional.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Red Temática Control Inteligente (DPI2015-71320-REDT), del Ministerio de Economía y Competitividad).

Referencias

- [1] Airbus, (2017) <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a330family/a330-200/>
- [2] Alonso Zotes, F., Santos, M. (2017) Una revisión de técnicas de optimización heurística para el diseño de trayectorias interplanetarias en misiones espaciales. RIAI, 14 (1) 1-15, 2017
- [3] Jimenez, J.F., Girón-Sierra, J.M., Insaurrealde, C., Seminario, M., (2007). A simulation of aircraft fuel management system. Simulation Modelling Practice and Theory 15(5) 544-564.
- [4] Langton, R., Clark, C., Hewitt, M. and Richards, L., (2009) Aircraft fuel systems. John Wiley & Sons, Ltd.
- [5] Mongeau, M., Bes, C., (2003) Optimization of aircraft container loading. IEEE Trans. on Aerospace & Electronics Systems 39(1) 140-150.
- [6] Plaza Alonso, E. (2016) Sistema de control para la distribución de combustible en una aeronave basado en técnicas de la inteligencia artificial, TFM, UNED
- [7] Santos, M., de la Cruz, J.M. (2009) Algoritmos genéticos. En: Métodos de Procesamiento Avanzado e Inteligencia Artificial en Sistemas Sensores y Biosensores, Reverté, cap. 15, 321-333.
- [8] Turgut, E.T., Rosen, M.A., (2012) Relationship between fuel consumption and altitude for commercial aircraft during descent: preliminary assessment with a genetic algorithm. Aerospace Science and Technology, 17(1) 65-73.

VISUALIZACIÓN WEB INTERACTIVA PARA EL ANÁLISIS DEL CHATTER EN LAMINACIÓN EN FRÍO

Daniel Pérez López, Abel Alberto Cuadrado Vega, Ignacio Díaz Blanco

Área de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Oviedo

Campus Universitario de Gijón, s/n.

{dperez, cuadrado}@isa.uniovi.es, idiaz@uniovi.es

Resumen

La laminación de productos de acero es un proceso dentro del campo de la metalurgia donde dos o más pares de rodillos reducen el espesor de una banda de acero para producir un material de espesor uniforme. A pesar de que se ha estudiado ampliamente durante muchos años, hay problemas impredecibles que pueden aparecer y afectar a la calidad del producto final. Uno de ellos es el denominado chatter, una potente vibración autoexcitada que aparece súbitamente y limita la productividad. En este artículo se considera un enfoque de analítica visual para el análisis del chatter que ayude a descubrir y entender los factores y condiciones en las cuales aparece el chatter. Se presenta una interfaz web interactiva que permite explorar una proyección de las condiciones dinámicas y visualizar detalles correspondientes a cada episodio de chatter. Se expone finalmente un caso de validación para probar la herramienta con datos reales, donde estados normales y de chatter se identificaron automáticamente.

Palabras clave: Modelos de datos, sistemas de soporte a la decisión, sistemas expertos.

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de laminación transforma la forma de un material de acero por medio de una reducción del espesor haciéndolo pasar entre dos o más pares de rodillos alojados en una caja que les sirve de soporte. Este proceso es diferente dependiendo de la temperatura del material laminado. Precisamente, un tren de laminación en frío [12] produce productos acabados más finos con un grosor de salida uniforme, llevado a cabo comúnmente de manera continua a través de varias cajas en los trenes de laminación en frío de tipo tándem. A pesar de que éste es un proceso universal en la elaboración de metales, todavía existen problemas que causan pérdidas económicas en los trenes modernos de laminación en frío. Además, las condiciones bajo las cuales surgen estos problemas no se comprenden completamente, lo que dificulta su prevención.

Uno de los principales problemas que presentan es una vibración autoexcitada denominada *chatter*, que aparece en los procesos de laminación, provocando variaciones de espesor inadmisibles en la superficie final de la banda, tal como se explica en [16]. La disminución de la velocidad de laminación para mitigar este efecto implica una pérdida de productividad que hace que el chatter no solo sea un problema industrial, sino también un problema económico. El análisis de chatter requiere la comprensión de las condiciones que conducen a la inestabilidad del proceso. Las interacciones dinámicas entre los fenómenos estructurales en el tren y el propio proceso de deformación de la banda se han estudiado utilizando modelos teóricos [9, 1, 21, 10, 23]. Estos modelos pueden llegar a ser complejos de implementar, o bien basarse en ciertos supuestos que simplifican el problema real.

Las tecnologías recientes facilitan la adquisición de datos de cualquier proceso y su almacenamiento masivo en bases de datos. Un análisis apropiado puede revelar cierta intuición acerca de problemas complejos y servir de apoyo al analista en la adopción de estrategias de actuación. Los algoritmos de análisis inteligente de datos (IDA) extraen información automáticamente de los datos permitiendo descubrir conocimiento nuevo. Un enfoque particularmente interesante es la reducción de la dimensionalidad (DR). Las técnicas DR permiten encontrar estructuras latentes de baja dimensionalidad en espacios de datos de alta dimensión, definiendo un mapeo que permite proyectar puntos de alta dimensión en un espacio latente de baja dimensión -típicamente 2D o 3D- que puede visualizarse y permite la implementación de mecanismos de interacción. Se puede encontrar una revisión detallada de las técnicas DR en el libro [8].

La presentación visual de los resultados de estos algoritmos es una excelente forma de comunicación [19] que puede mejorar la comprensión del problema y sugerir una actuación más rápida. Los mecanismos de interacción introducen al humano en el proceso de análisis, permitiéndole incorporar conocimiento de dominio del problema durante la exploración de datos, en lugar de usar representa-

ciones estáticas. Los métodos de analítica visual (VA) permiten explotar la sinergia entre los algoritmos de análisis de datos inteligente, las técnicas de visualización y la interacción para apoyar al usuario en la consecución de un análisis eficiente. El enfoque VA se basa en el razonamiento analítico a través de interfaces interactivas, como se explica en [15] y [6].

En este artículo se propone un análisis del chatter utilizando el enfoque VA, permitiendo al usuario explorar las diferentes condiciones dinámicas del proceso. Esto se realiza a través de una interfaz web que permite el análisis de datos reales resultantes de algoritmos que separan comportamientos dinámicos de condiciones normales y de fallo (chatter). Los comportamientos dinámicos, caracterizados por vectores de características de alta dimensión son proyectados en un espacio latente 2D usando un algoritmo DR, y representados en una interfaz web interactiva sobre la que el usuario puede explorarlos y obtener detalles bajo demanda, como el espectrograma. El artículo está organizado como sigue: en la sección 2 se revisan trabajos previos que analizan el proceso de laminación; en la sección 3 se explica el análisis de datos para tratar el fallo del chatter; en la sección 4 se describe un caso de estudio real como método de validación; finalmente, en la sección 5 se exponen las conclusiones y se sugieren las líneas para el trabajo futuro.

2. TRABAJO RELACIONADO

Los fenómenos de vibración aparecen en procesos de laminación como resultado de las interacciones dinámicas producidas [16]. Hay dos modos principales de vibración vertical: el modo de tercera octava (120-250 Hz) y el modo de quinta octava (500-700 Hz), siendo el primero de ellos el más dañino, que ocurre de forma repentina acumulando una gran cantidad de energía en pocos segundos. Identificamos aquí al chatter con este modo de vibración de tercera octava.

Varios trabajos han estudiado este fenómeno previamente. Los primeros estudios sobre el tema [21, 10, 14] definen el chatter como un modo autoexcitado de vibración, y estudian las posibles causas a través de modelos. En [23], se recogen varios modelos para la estructura del tren y el proceso de laminación, los cuales se combinan para obtener modelos de chatter.

Los modelos estructurales clásicos están basados en un sistema masa-muelle, donde las fuerzas se representan en términos de rigidez y amortiguamiento. Dado que algunos de estos modelos asumen simetría respecto al hueco de los rodillos, so-

lo la parte superior se considera para el análisis. Los modelos del proceso de laminación son expresiones matemáticas relacionadas con los parámetros de laminación que ayudan a determinar, por ejemplo, la fuerza de laminación, el par, el punto neutro, la tensión, etc. Todas implican coeficientes tales como el límite elástico y la fricción.

Matemáticamente, puede representarse un modelo simplificado mediante una ecuación diferencial que contiene las dependencias entre variables expresadas en la ecuación 1 (omitiendo referencia explícita a las derivadas de diversos órdenes que puedan aparecer), donde el espesor de salida (h_s) depende de la fuerza de laminación (F), las tensiones de entrada y salida (σ_e y σ_s), las velocidades (v_e y v_s) y el espesor de entrada (h_e). El principal objetivo es el estudio de la función f y las variables que afectan internamente al sistema:

$$h_s = f(F, \sigma_e, \sigma_s, v_e, v_s, h_e) \quad (1)$$

Hay más elementos en el proceso que intervienen en el funcionamiento del sistema completo. En [20] se propone un modelo de caja única en espacio de estados, acoplando modelos del proceso dinámico de laminación, la estructura de la caja y el sistema servo hidráulico. Este sistema se simplifica para llevar a cabo un control robusto del espesor. También, el estudio de la estabilidad con respecto a los parámetros de laminación en [4] o el uso de modelos de múltiples cajas en trenes de laminación tipo tándem, como se explica en [24] o en [5], incrementan la complejidad del estudio. Por tanto, aún existen dificultades para una comprensión completa de las condiciones que conducen a la inestabilidad del sistema.

Los algoritmos de análisis de datos pueden utilizarse para estudiar las condiciones dinámicas. Por ejemplo, los mapas topológicos autoorganizados se han utilizado para explorar el comportamiento dinámico de procesos industriales, incluido el análisis de trenes de laminación [3]. También se ha descrito el uso de técnicas de *manifold learning* para generar mapas visuales de estados de vibración en máquinas rotativas [2] o comportamientos dinámicos de trenes de laminación en frío, proyectados en una visualización estática [11], que puede utilizarse como un mapa de estados de vibración del proceso. En [7] y en [17] se pueden encontrar referencias acerca de cómo los beneficios cognitivos de la visualización pueden ayudar a interpretar de forma eficiente la información.

Aunque estos trabajos aportan mapas para analizar comportamientos dinámicos, carecen de mecanismos de interacción que podrían mejorar drásticamente la exploración de datos. La interacción es

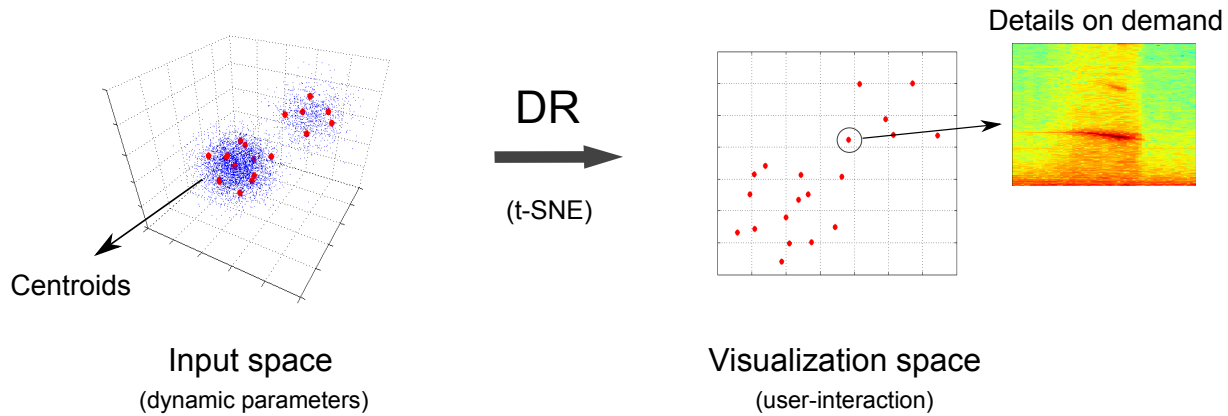


Figura 1: Esquema donde características dinámicas de los datos se proyectan en un espacio de visualización.

una parte clave en los interfaces visuales, porque permite la manipulación y el enfoque selectivo en la representación. Trabajos previos, como [13] o [22], describen taxonomías de los mecanismos de interacción. La combinación entre los algoritmos y los beneficios de la visualización sugieren soluciones basadas en el paradigma de analítica visual para abordar problemas complejos [6].

3. DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS

En esta sección se describe un procedimiento para el análisis de datos del chatter que permite aportar intuición al problema. Aquí se expone un método automático de identificación de condiciones de funcionamiento, una extracción de características y un método para obtener la proyección. En la Fig. 1 se muestra un esquema del enfoque propuesto.

3.1. IDENTIFICACIÓN DE CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO

En primer lugar, se llevó una extracción de estados de funcionamiento para identificar condiciones normales y de chatter mediante algoritmos automáticos. Este proceso se lleva a cabo en dos fases:

3.1.1. Condiciones de chatter

El algoritmo de identificación de episodios de chatter se basa en el seguimiento del armónico de máxima amplitud de una señal $A(t)$, que puede ser la desviación de espesor de salida o la vibración de una caja, dentro de la banda de chatter usando “Short-Time Fourier Transform” (STFT) o espectrograma. Se considera la posibilidad de existencia de chatter cuando dicho armónico su-

pera cierto umbral A_c . Para confirmar la presencia de un episodio de chatter el algoritmo también se apoya en la identificación de bajadas de velocidad de laminación $v(t)$ presumiblemente realizadas por el sistema de detección de chatter existente en el tren. El funcionamiento del algoritmo depende del ajuste de un cierto número de parámetros, como por ejemplo los límites de la banda de chatter, el umbral para el armónico de máxima amplitud, y otros, hasta completar un número de alrededor de 16. La mayoría de esos parámetros se han ajustado de manera heurística. Una de las razones de hacerlo así es la falta de conocimiento exacto de los detalles del funcionamiento del propio sistema de detección de chatter instalado en el tren. Por tanto es de interés disponer de una herramienta que permita evaluar los resultados del algoritmo y ayudar a la selección de sus parámetros, como se verá más adelante.

En la Fig. 2 se muestra un esquema de este sistema de identificación automático. En el caso de detectarse una condición de chatter, se calcula un coeficiente α ajustando la evolución temporal del armónico analizado a la ecuación $A(t) = Ke^{\alpha t}$. Este parámetro puede utilizarse como una medida de la severidad de la inestabilidad producida por el fallo.

3.1.2. Condiciones normales

A partir de las bobinas que no contenían episodios de chatter, se implementó una identificación de condiciones normales detectando tramos constantes en la velocidad de laminación de la última caja, descartando todas las variaciones que pueden suceder tales como el aumento y descenso que suceden en inicio y el final del proceso de laminación respectivamente.

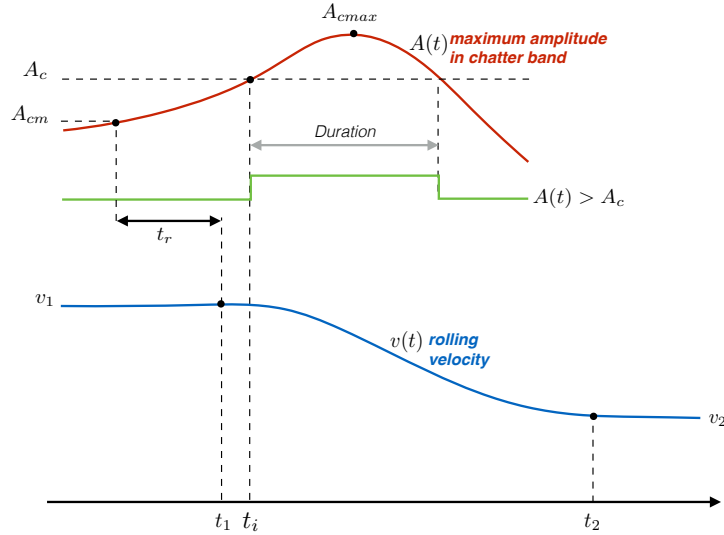


Figura 2: Esquema del método de identificación de chatter.

3.1.3. Extracción de características

Finalmente, una vez que ambos tipos de funcionamiento han sido detectados, se tomaron segmentos de 1 segundo para calcular ciertas características en cada condición, para varias variables.

3.2. MÉTODO DE PROYECCIÓN DE DATOS

Se implementó un sencillo método para obtener un conjunto manejable para calcular su proyección. En la Fig. 3 se muestra un diagrama de bloques del método implementado.

Dado que existen una gran cantidad de condiciones normales que pueden identificarse, se llevó a cabo un submuestreo, seguido de una etapa de cuantificación vectorial usando el método k -means, con el objeto de reducir el conjunto de datos para este tipo de condición. Los centroides resultantes son prototipos representativos de este tipo de funcionamiento del proceso, pero no describen puntos reales del proceso. Con el objeto de trabajar con situaciones reales, se consideraron, por tanto, los puntos más cercanos a los prototipos.

Reuniendo todos los vectores de condiciones normales y de chatter, se construyó una matriz de datos y se normalizó eliminando la media y escalándola de forma que tenga varianza unidad para cada variable.

Se obtuvo una proyección para visualizar las similitudes usando el algoritmo t -SNE [18]. Esta técnica es muy superior a las anteriores basadas en esquemas básicos de preservación de distancias. El t -SNE, por el contrario, considera la vecindad de

los puntos de entrada $\{\mathbf{x}_i\}_{i=1,\dots,N}$ siendo $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^D$, por medio de una matriz de probabilidad P , donde:

$$p_{j|i} = \frac{\exp(-\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|^2 / 2\sigma_i^2)}{\sum_{k \neq i} \exp(-\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_k\|^2 / 2\sigma_i^2)} \quad (2)$$

El algoritmo utiliza una transformación simétrica de dicha matriz. En paralelo, las probabilidades de los puntos de baja dimensión, $\{\mathbf{y}_i\}_{i=1,\dots,N} \in \mathbb{R}^d$ con $d < D$ son modelados mediante una distribución t -Student de un grado de libertad, definiéndose Q como:

$$q_{ij} = \frac{(1 + \|\mathbf{y}_i - \mathbf{y}_j\|^2)^{-1}}{\sum_{k \neq l} (1 + \|\mathbf{y}_k - \mathbf{y}_l\|^2)^{-1}} \quad (3)$$

Las diferencias entre las distribuciones de probabilidad P y Q son evaluadas utilizando la divergencia de Kullback-Leibler:

$$D_{KL}(P||Q) = \sum_j p_{ij} \log \frac{p_{ij}}{q_{ij}} \quad (4)$$

El cálculo de los puntos \mathbf{y}_i que minimizan esta divergencia permite obtener la proyección resultante.

4. CASO DE ESTUDIO

4.1. Análisis de datos reales

Para validar el análisis se utilizan datos reales de un tren tándem procedentes de un proceso de laminación en frío. Los algoritmos descritos en la sección 3 se desarrollaron en lenguaje Python utilizando paquetes como pandas, scipy o scikit-learn.

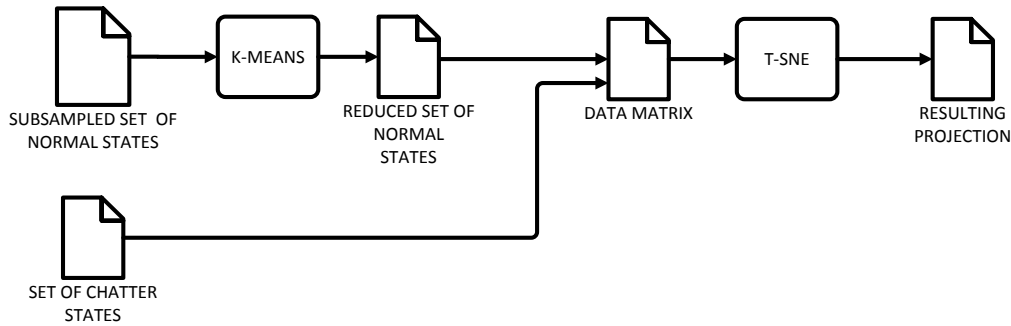


Figura 3: Flujograma para la obtención de la proyección.

Los datos recogidos de un tren tándem de laminación en frío corresponden a una producción de 4102 bobinas. Las variables seleccionadas para caracterizar las condiciones dinámicas incluyen magnitudes como fuerzas, tensiones, velocidades de laminación o reducciones estimadas $\left(r_i = 1 - \frac{v_{ie}}{v_{is}}\right)$, siendo v_{ie} y v_{is} las velocidades de entrada y salida respectivamente en la caja i . Estas variables se describen de manera detallada en la Tabla 1. Para obtener la proyección, se consideran todas las variables de la tabla, excepto el número de identificación (1) y el tipo de material (2). Las características utilizadas son los valores medios de segmentos de la señal (de un segundo de duración), excepto en el caso de las vibraciones, para las que se calcularon los valores eficaces (RMS).

Tabla 1: Descripción de las variables.

#	Descripción	Unidades
1	Número de identificación	-
2	Tipo de material	-
3	Espesor objetivo de entrada	μm
4	Espesor objetivo de salida	μm
5	Ancho de la bobina	mm
6	Suma de fuerzas en caja 4	t
7	Suma de fuerzas en caja 5	t
8	Tensión entre cajas 3-4	t
9	Tensión entre cajas 4-5	t
10	Velocidad laminación caja 3	m/min
11	Velocidad laminación caja 4	m/min
12	Velocidad laminación caja 5	m/min
13	Vibración caja 4 (RMS)	g
14	Vibración caja 5 (RMS)	g
15	Desviación espesor de salida	%
16	Reducción caja 4	-
17	Reducción caja 5	-

A pesar de no utilizar en este caso características dinámicas realmente, las características escogidas pretenden discriminar entre diferentes puntos de

funcionamiento que, al tratarse de un sistema no lineal y variante, corresponderán a diferentes comportamientos dinámicos.

Se aplicó el método explicado en la Sección 3.2 a un conjunto de entrenamiento de condiciones normales con un tamaño de más de 1 millón de observaciones. La operación de submuestreo redujo el conjunto a 10000 muestras y con el algoritmo k -means resultan finalmente 1000 centroides, con los que se calculan sus puntos más cercanos. Por otra parte, las condiciones de chatter identificadas fueron 519 episodios, por lo que la matriz de datos resultante tiene unas dimensiones de 1519×15 . Para realizar la reducción de la dimensionalidad, se utilizó el algoritmo t -SNE de la librería scikit-learn, con una inicialización PCA, una velocidad de aprendizaje (*learning rate*) de 900 y una perplejidad (*perplexity*) de 30, ambas determinadas experimentalmente.

Para calcular los espectrogramas se utilizó la señal de la desviación de espesor de salida, con un segmento de tamaño 1024 y ventana Tukey. Para facilitar su comparación, todos los espectrogramas se calcularon en la misma banda de frecuencias, comprendida entre 0 y 400 Hz y con la misma escala de color para las amplitudes. Asimismo, se calculó la mayor duración de un episodio de chatter (que resultó ser de 10 segundos) para establecer un rango de tiempos común para todos los espectrogramas.

4.2. Aplicación web

La aplicación debería permitir al usuario identificar estados dinámicos similares rápidamente en una vista general donde se puedan identificar las condiciones de fallo fácilmente. Esto se obtiene por medio de la proyección t -SNE de los vectores dinámicos, la cual proporciona un mapa de los estados dinámicos donde puntos cercanos representan condiciones dinámicas similares. La evaluación de estos episodios se puede realizar fácilmente

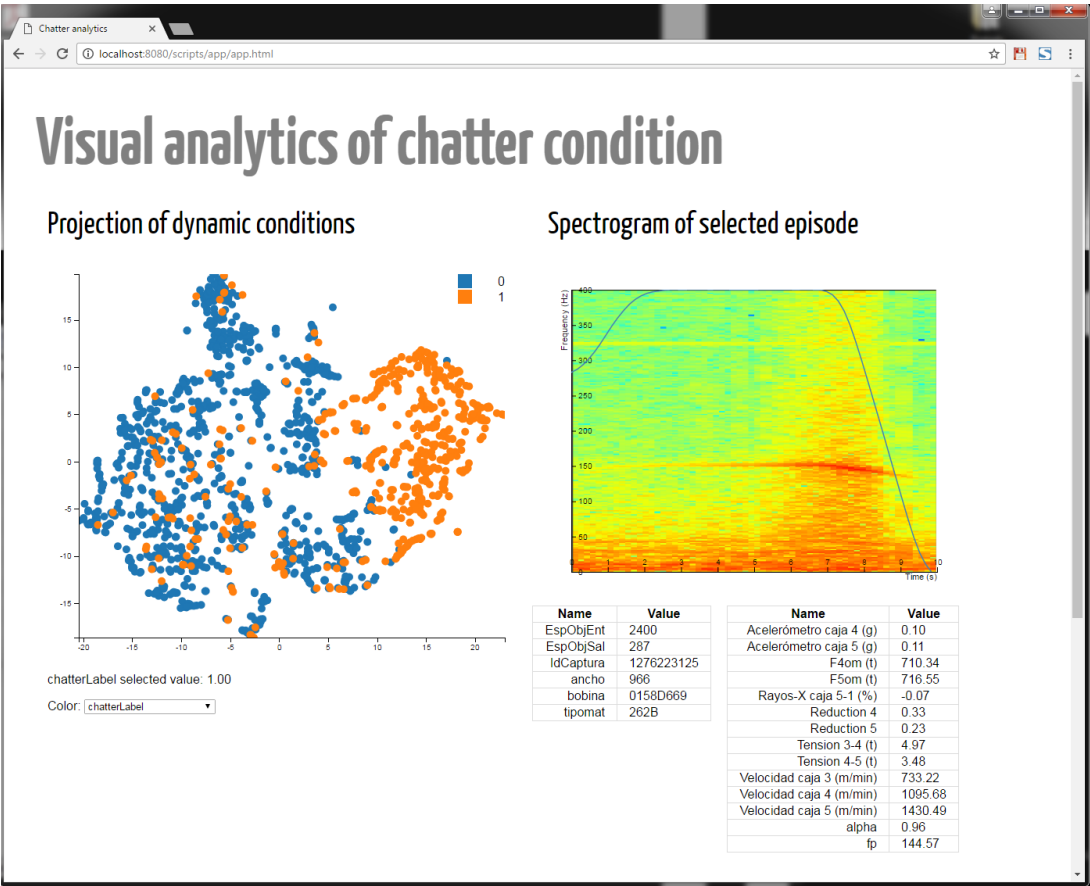


Figura 4: Captura de pantalla de la aplicación mostrando la proyección de los estados dinámicos (izda.), el espectrograma (dcha.) y las tablas.

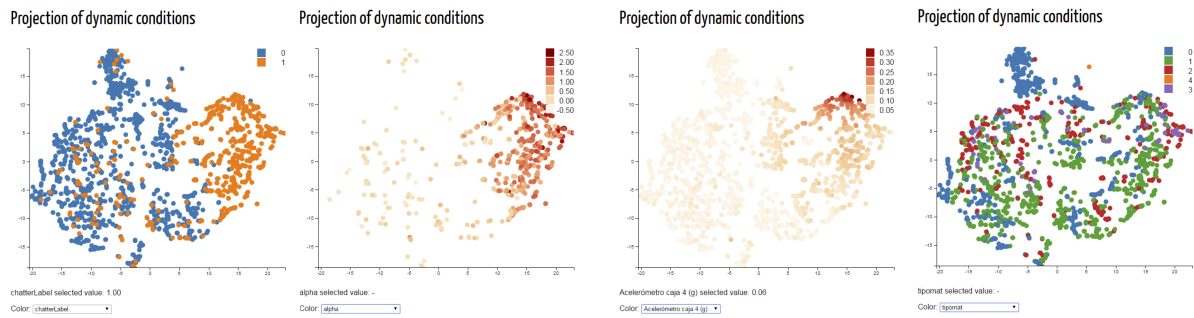


Figura 5: Proyección usando varias escalas de color (de izda. a dcha.): estado normal/chatter, parámetro α , vibración en la 4ª caja y tipo de material.

a través de los espectrogramas, que aportan una representación tiempo-frecuencia detallada de cada episodio. Esto se puede hacer bajo demanda, estableciendo conexiones entre ambas vistas.

En la Fig. 4 se muestra una captura de pantalla del prototipo web diseñado. La representación de puntos muestra la proyección t-SNE de los estados dinámicos donde el color de los puntos muestra el valor de una determinada variable, con una escala de color predefinida. El usuario puede cambiar esa variable por medio de un selector. Mecanismos de interacción adicionales, como zoom o pan, están disponibles para facilitar la exploración en la proyección.

Gracias al principio de especialización proporcionado por el algoritmo t-SNE (cerca similar), los estados de chatter parecen estar más aislados que el resto de las condiciones normales de operación, haciéndolos visualmente identificables por el usuario. Sin embargo, algunas excepciones de episodios que fueron etiquetados como chatter en etapas previas, se situaron en el área del mapa de condición normal, donde evaluaciones más detalladas pueden llevarse a cabo utilizando esta aplicación.

Moviendo el puntero del ratón sobre los puntos de la proyección, se resalta el punto seleccionado y el valor exacto de la variable del color se muestra en un texto debajo. Además, si es un episodio de chatter, el espectrograma calculado se muestra a la derecha. La línea azul sobre el espectrograma indica la velocidad de laminación de la última caja. Todos los espectrogramas, se calcularon con las mismas especificaciones, entre 0 y 400 Hz y un rango de tiempo de 10 segundos, como se indicó previamente. Los mismos mecanismos de zoom y pan se pueden aplicar al espectrograma, permitiendo al usuario navegar en los detalles de la imagen. Esto ayuda al usuario a confirmar, de manera visual, la existencia de un episodio de chatter identificado de manera automática previamente.

Debajo de la imagen del espectrograma hay dos tablas que muestran los detalles del punto elegido. La tabla de la izquierda incluye parámetros característicos de la bobina, como el ancho, tipo de material, o espesor objetivo. La tabla de la derecha muestra valores de la condición dinámica como los valores medios.

Mientras el usuario navega por los puntos proyectados, el espectrograma y los valores de las tablas se actualizan de manera instantánea. Esto permite una rápida exploración de las condiciones dinámicas y la evaluación de los detalles de cada episodio de chatter, previamente identificado, que el usuario seleccione.

En la Fig. 5 se muestra la proyección con diferentes

escalas de color representando varias variables (de izquierda a derecha): el estado de normal/chatter, parámetro α , vibración en caja 4 y tipo de material. La comparación entre las distintas representaciones permite encontrar relaciones entre variables. Por ejemplo, puede apreciarse cómo la figura muestra al usuario visualmente que el parámetro α tiene valores más altos para los estados de chatter dentro del área de chatter o que la mayor vibración de la caja 4 corresponde a parte de los estados de chatter.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se propone un enfoque basado en el paradigma de *analítica visual* para un análisis exploratorio de condiciones de chatter. Se procesaron datos reales procedentes de un proceso de laminación en frío para identificar condiciones de funcionamiento normales y de chatter de forma automática. Se calcularon vectores compuestos por 15 descriptores del proceso para caracterizar ambos tipos de estados dinámicos. A partir de estos vectores se realizó una proyección 2D utilizando el algoritmo t-SNE, que aporta una visualización eficaz de los estados y a la vez permite mostrar de forma rápida los espectrogramas correspondientes a los estados de chatter, mediante eventos tipo *hover*.

Se desarrolló una aplicación web para exploración interactiva de datos que ayuda al usuario a obtener una vista general de las condiciones normales y de chatter en el proceso, que al mismo tiempo aporta detalles bajo demanda de cualquier episodio de chatter identificado. De esta manera, se han revisado visualmente episodios previamente detectados como chatter de manera automática que resultan dudosos, pudiéndose evaluar el grado de severidad del episodio. Por tanto, esto puede ser utilizado como herramienta para una validación visual del fallo del chatter, así como método de apoyo para el refinado experimental de los parámetros involucrados en el algoritmo de detección automática de chatter.

Las líneas de trabajo futuro incluyen el desarrollo de vistas coordinadas, dotadas de nuevos mecanismos de interacción como el filtrado, que permitan al usuario seleccionar las partes interesantes de los datos para descubrir conocimiento nuevo acerca de los fallos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO), Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) “Una manera de hacer

Europa”, bajo el proyecto de referencia DPI2015-69891-C2-2-R.

Referencias

- [1] J. Alexander. On the theory of rolling. In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, volume 326, pages 535–563. The Royal Society, 1972.
- [2] I. Díaz, A. A. Cuadrado, A. B. Díez, and M. Domínguez. Manifold learning for visualization of vibrational states of a rotating machine. In *ICANN (2)*, pages 285–292, 2011.
- [3] I. Díaz, M. Domínguez, A. A. Cuadrado, and J. J. Fuertes. A new approach to exploratory analysis of system dynamics using som. applications to industrial processes. *Expert Systems with Applications*, 34(4):2953–2965, 2008.
- [4] A. Heidari and M. R. Forouzan. Optimization of cold rolling process parameters in order to increasing rolling speed limited by chatter vibrations. *Journal of Advanced Research*, 4(1):27–34, Jan. 2013.
- [5] P.-H. Hu and K. F. Ehmann. Stability analysis of chatter on a tandem rolling mill. *Journal of Manufacturing Processes*, 2(4):217–224, 2000.
- [6] D. A. Keim, F. Mansmann, J. Schneidewind, J. Thomas, and H. Ziegler. *Visual analytics: Scope and challenges*. Springer, 2008.
- [7] J. H. Larkin and H. A. Simon. Why a diagram is (sometimes) worth ten thousand words. *Cognitive science*, 11(1):65–100, 1987.
- [8] J. A. Lee and M. Verleysen. *Nonlinear dimensionality reduction*. Springer, New York; London, 2007.
- [9] E. Orowan. The calculation of roll pressure in hot and cold flat rolling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 150(1):140–167, 1943.
- [10] D. L. Paton and S. Critchley. Tandem mill vibration: Its cause and control. In *Mechanical Working; Steel Processing XXII, Proceedings of the 26th Mechanical Working; Steel Processing Conference.*, pages 247–255, Chicago, IL, USA, 1985. Iron and Steel Soc Inc.
- [11] D. Pérez, F. García-Fernández, I. Díaz, A. Cuadrado, D. Ordóñez, A. Díez, and M. Domínguez. Visual analysis of a cold rolling process using a dimensionality reduction approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(8):1865–1871, 2013.
- [12] W. L. Roberts. *Cold rolling of steel*. Marcel Dekker, Inc., New York, 1978.
- [13] B. Shneiderman. The eyes have it: A task by data type taxonomy for information visualizations. In *Visual Languages, 1996. Proceedings., IEEE Symposium on*, pages 336–343. IEEE, 1996.
- [14] T. Tamiya, K. Furui, and H. Iida. Analysis of chattering phenomenon in cold rolling. In *International Conference on Steel Rolling*, volume 2, pages 1191–1202, 1980.
- [15] J. J. Thomas and K. A. Cook. *Illuminating the path: The research and development agenda for visual analytics*. IEEE Computer Society Press, 2005.
- [16] J. Thusty, G. Chandra, S. Critchley, and D. Paton. Chatter in cold rolling. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 31(1):195–199, 1982.
- [17] E. R. Tufte and P. Graves-Morris. *The visual display of quantitative information*, volume 2. Graphics press Cheshire, CT, 1983.
- [18] L. Van der Maaten and G. Hinton. Visualizing data using t-SNE. *Journal of Machine Learning Research*, 9:2579–2605, 2008.
- [19] C. Ware. *Information visualization: perception for design*. Elsevier, 2012.
- [20] X. Yang and C.-n. Tong. Coupling dynamic model and control of chatter in cold rolling. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 134(4):041001, 2012.
- [21] I. Yarita. Analysis of chattering in cold rolling for ultra-thin gauge steel strip. *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, 18(1):1–10, 1978.
- [22] J. S. Yi, Y. ah Kang, J. T. Stasko, and J. A. Jacko. Toward a deeper understanding of the role of interaction in information visualization. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, 13(6):1224–1231, 2007.
- [23] I. S. Yun, W. R. D. Wilson, and K. F. Ehmann. Review of chatter studies in cold rolling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(12):1499–1530, 1998.
- [24] H. Zhao and K. F. Ehmann. Stability analysis of chatter in tandem rolling mills?part 1: single-and multi-stand negative damping effect. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135(3):031001, 2013.

BANCADA PARA ANÁLISIS INTELIGENTE DE DATOS EN MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL

Daniel Pérez López, Diego García Pérez, Ignacio Díaz Blanco, Abel Alberto Cuadrado Vega

Área de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Oviedo

Campus Universitario de Gijón, s/n.

{dperez, diegogarcia, cuadrado}@isa.uniovi.es, idiaz@uniovi.es

Resumen

Todas las estructuras están sometidas a diversos factores que afectan a su funcionamiento óptimo, incluso pueden provocar fallos en las mismas. La monitorización de la salud estructural consta de métodos que estudian el estado de una estructura, de manera que se identifique o localice un posible defecto mediante técnicas de análisis de vibraciones. Para explorar este campo de estudio es preciso tener una fuente de datos procedentes de un sistema real. Para ello, se propone diseñar un banco de ensayos en un laboratorio, el cual permita flexibilidad en su configuración, repetibilidad en los ensayos y fácil acceso a los datos medidos. En este trabajo se presenta el diseño de un sistema de banco de ensayos para la monitorización de salud estructural, formado por: una estructura metálica sencilla, un sistema de excitación de la estructura y herramientas de adquisición de las señales de vibración. Por último, se presenta un primer trabajo de análisis modal de las vibraciones basado en un análisis de componentes principales (principal component analysis, PCA).

Palabras clave: monitorización de salud estructural, métodos basados en vibración, análisis inteligente de datos

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de monitorización de salud estructural (*structural health monitoring*, SHM) son aquellos capaces de monitorizar el rendimiento de sistemas mecánicos (máquinas, aeronaves, grandes estructuras, etc.), detectando las desviaciones del sistema con respecto a un estado óptimo, generalmente el estado inicial. Estas desviaciones se denominan daños, los cuales pueden clasificarse en defectos, si únicamente afectan al rendimiento del sistema, o en fallos si estos defectos llevan al sistema a un estado en el que se comprometa su correcto funcionamiento, dejando de ser apto para el usuario.

Las técnicas SHM tienen como objetivo detectar tanto fallos como defectos en los sistemas mecáni-

cos aportando, además, información característica sobre ellos. Dentro de la literatura [17], una de las muchas formas de clasificar las técnicas SHM, es según la cantidad de información con la que caracterizan un defecto:

- Nivel 1: determinan la existencia de un defecto.
- Nivel 2: determinan la localización del defecto.
- Nivel 3: cuantifican la severidad del daño.
- Nivel 4: predicen el tiempo de vida del sistema.

A la hora de afrontar estos objetivos uno de los métodos más comunes en el estado del arte es el análisis de vibraciones del sistema, conocido como *vibration-based methods* [12]. Este tipo de técnicas se basan en el análisis modal de vibraciones medidas en el propio sistema monitorizado. El análisis de vibraciones es un método consolidado en la monitorización de defectos en máquinas rotatorias o *condition monitoring* (CM) como se denomina en la literatura [8, 9]. CM es un campo de estudio análogo a SHM, y por tanto es común hacer uso de técnicas similares basadas en vibraciones en ambos campos de estudio, pero se diferencian en que los datos de vibraciones recogidos de máquinas rotatorias suelen ser más invariantes a condiciones de entorno que las medidas procedentes de grandes estructuras, lo que dificulta en gran medida el análisis de salud estructural.

Profundizando en los métodos basados en análisis de vibraciones, el paradigma principal de este tipo de técnicas, tanto para CM como para SHM, es el *reconocimiento estadístico de patrones*, el cual según [13] se divide en cuatro tareas principales:

1. Evaluación operativa.
2. Adquisición de datos y su normalización.
3. Extracción de características.
4. Desarrollo de modelos.

Todos los ámbitos definidos por [13], salvo el primero, presentan una fuerte conexión con el análisis inteligente de datos (*intelligent data analysis*, IDA) aplicado a problemas de ingeniería, uno de los principales objetivos de las líneas de investigación activas en nuestro grupo [11, 10, 16]. Es, por tanto, una motivación iniciar una línea de investigación en este campo, ya que muchos de los conceptos de IDA adquiridos en trabajos anteriores son perfectamente transferibles al ámbito del SHM. Además, ciertas cuestiones abiertas de SHM, como conseguir una invariabilidad de los datos a las condiciones de entorno mediante una correcta extracción de características [15], pueden servir de motivación para la aplicación de técnicas novedosas de IDA como el *aprendizaje profundo* o *deep learning*, las cuales son objeto de interés en nuestra actividad investigadora.

Para iniciar una línea de estudio en SHM es claramente necesario un repositorio de datos de partida. En este punto se puede optar por repositorios públicos [6], o por la recogida de datos propios, los cuales pueden proceder de sistemas reales en funcionamiento, o de bancos de ensayo que simulen un sistema real. De las tres posibilidades planteadas, consideramos que la última opción parece la más adecuada para el inicio de una investigación en este campo, ya que un banco de ensayos modular permite simular problemas de estudio a medida, pudiendo regular escalonadamente la dificultad de los mismos. El objetivo de este artículo es mostrar el diseño de una bancada, que permita la recogida de medidas de vibraciones de una estructura simple para su posterior análisis modal.

En el apartado 2, se describirá el diseño propuesto y los detalles técnicos del banco de ensayos. En el apartado 3 se muestra un ejemplo de extracción de características y una proyección basada en el análisis de componentes principales (*principal component analysis*, PCA). Las limitaciones que presenta nuestro diseño y los aspectos a mejorar son expuestos en el apartado 4. Por último, en el apartado 5 se describen las conclusiones de nuestro diseño, así como las líneas de trabajo futuras.

2. DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE ENSAYOS

2.1. ESTRUCTURA METÁLICA

La estructura consta de una base, dos pilares (elementos verticales) y una viga que los une horizontalmente, formada por 3 barras unidas por medio de tornillos, tal como se aprecia en la figura 1.

El carácter modular de la estructura nos permi-

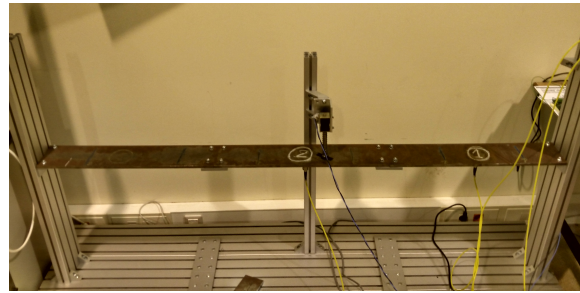


Figura 1: Imagen de la estructura. Se muestra la estructura propuesta, el actuador y los acelerómetros situados en las posiciones 1 (izquierda) y 2 (central) de la estructura.

te modificar su configuración fácilmente, con el fin de introducir perturbaciones de distinta índole al sistema, simulando situaciones anómalas características en los sistemas reales (desgastes en los anclajes, cambios anómalos en la distribución de las cargas, etc). Con esta configuración planteada se pretende imitar una estructura con viga de directriz recta, uno de los elementos estructurales básicos de los que se componen estructuras más complejas como estructuras formadas con vigas en celosía.

2.2. SISTEMA DE EXCITACIÓN

A la hora de desarrollar un sistema automático que determine la salud de una estructura, es necesario tener un módulo de adquisición de datos. Como se ha mencionado en la introducción, los métodos de adquisición más comunes son aquellos que están basados en el concepto de *vibration-based damage detection* [14]. Este tipo de sistemas engloban tres aspectos: 1) sistema de excitación, 2) tipo de sensores y 3) el número de sensores y su localización dentro de la estructura.

Este estudio se centra en el diseño del sistema de excitación ya que es el único aspecto de los mencionados que no depende del tipo de análisis a realizar en las etapas posteriores a la adquisición de datos [9]. En muchos de los sistemas basados en vibraciones no es necesario el uso de ningún excitador del sistema, sino que con la propia vibración natural del sistema es suficiente para extraer la información necesaria de su estado, pero en el caso concreto de bancadas que simulen a pequeña escala un sistema real es necesario el uso de una excitación externa, ya que carecen de vibración natural.

Una vez definida la necesidad de un sistema de excitación, para su diseño se debe satisfacer necesidades comunes en el desarrollo de metodologías de análisis de datos, como pueden ser una alta acce-

sibilidad a los datos, flexibilidad a la hora de cambiar su configuración y la repetibilidad de los ensayos. De acuerdo con estas funcionalidades mencionadas se propone un sistema de excitación formado por tres bloques: 1) percutor, 2) preaccionador y 3) controlador.



Figura 2: Imagen del actuador desmontado.

2.2.1. Percutor

El percutor, como se muestra en la figura 2, lo constituye una bobina de 24 V y 1A, la cual genera un campo magnético que atrae el eje metálico hacia su núcleo. En uno de los extremos del eje, se tiene una rosca con una tuerca que permiten sujetar un muelle. Cuando la bobina está energizada el muelle se encuentra contraído y cuando la corriente dentro de la bobina es cero, el muelle arrastra el eje hasta su posición de reposo, consiguiendo un movimiento lineal y golpeando la superficie de la bancada.

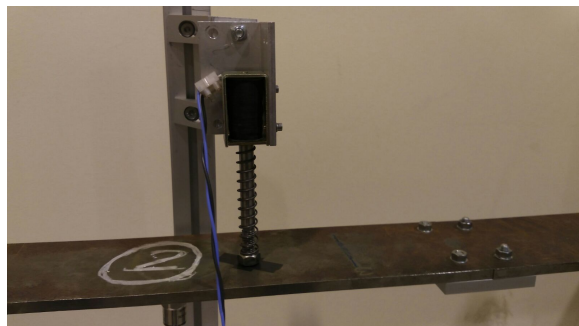


Figura 3: Imagen del actuador acoplado a la bancada.

En la figura 3 se pueden ver el percutor y el montaje que lo acopla a la bancada. Se puede apreciar como en la superficie de la estructura se recubre con un material aislante (de color negro) justo en la zona donde impacta el percutor. Esto es debido a que el campo magnético creado por la bobina es tan fuerte que es capaz de atraer la propia estructura hacia el núcleo de la bobina. Por ello, se debe interponer entre el eje y la estructura un medio no magnético.

2.2.2. Preaccionador

El preaccionador es el driver MD22 [3] mostrado en la figura 4, utilizado para el control de motores de corriente continua de media y baja potencia. Este driver alimentado con 24 V, está constituido por un puente en H capaz de regular el sentido y la intensidad de la corriente de salida llegando a valores máximos de 5A, por lo que es perfectamente apto para el control de activación de nuestra bobina.

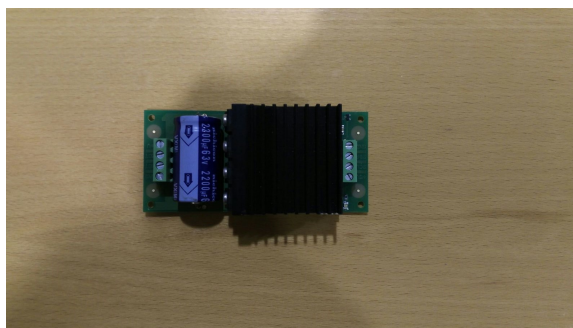


Figura 4: Driver MD22.

Este driver es capaz de regular la corriente que circula por la bobina del percutor, actuando como un relé que abre o cierra el circuito de alimentación de la bobina del percutor. En este caso, no interesa regular la corriente, por lo que se hace uso de su modo de funcionamiento como relé, o modo analógico. En este modo, con una señal de control de 0 V, se alimenta la bobina con +24 V, mientras que con una señal de control de 2,5 V, la bobina se desconecta.

En el momento que se inicia una recogida de datos, la bobina se activa contrayendo el muelle y elevando el eje. En este estado, el driver está alimentado en su entrada de control con 2,5V. A la hora de realizar un golpeo, se debe enviar al driver un pulso de 0V, por lo que la señal de golpeo es en lógica inversa.

2.2.3. Controlador

Las señales de control que rigen el comportamiento del driver, son enviadas por el controlador, en nuestro caso un *arduino mega 2560* [4]. Este modelo de arduino contiene un microcontrolador (AVR ATmega2560), el cual se puede programar mediante el IDE propietario de arduino.

El diseño del programa cargado en el controlador atiende principalmente a una de las funcionalidades de la bancada: la disponibilidad de los datos. De acuerdo con esta premisa se ha considerado que el banco de ensayos pueda ser manejado vía serie desde un ordenador desde el cual se puedan iniciar los ensayos y recoger los datos medidos por los sen-

sores. Por ello, el programa cargado en el microcontrolador tiene como cometido leer las órdenes enviadas por parte del PC vía serie, y actuar sobre la bancada acorde a estas consignas.

La comunicación serie en el PC, que en definitiva es la interfaz de manejo de la bancada para el usuario, debe ser manejada dentro de un entorno de desarrollo que soporte una comunicación serie (C++, Java, Python, etc). A la hora optar por uno de estos entornos se eligió Python [5], el cual es ampliamente reconocido en el ámbito de la ciencia de datos y que facilitará las etapas posteriores a la adquisición de datos dentro del paradigma de reconocimiento de patrones.

El programa alojado en arduino es muy sencillo: en ausencia de eventos por parte del bus serie el microcontrolador ha de suministrar al driver un nivel de tensión constante de 2,5V; cuando llega una orden “start” desde Python vía serie, el arduino envía un pulso de 0V de amplitud y 100 ms de duración al driver, produciendo un impacto en la bancada por parte del actuador.

Gracias a esta configuración del sistema de excitación es posible tener una alta flexibilidad a la hora de definir la excitación del ensayo, pudiendo generar ensayos con un único impacto, impactos a frecuencias determinadas o planificar una batería de ensayos en instantes específicos. Los resultados presentados en este artículo han sido obtenidos mediante señales procedentes de ensayos con un único impacto.

2.3. SENSORES Y ALMACENAMIENTO DE LOS DATOS

La respuesta de la estructura a la entrada introducida por el sistema de excitación es recogida por dos acelerómetros, fijados sobre la parte inferior de la viga en las posiciones 1 y 2 de la estructura como muestra en la figura 1. Los acelerómetros se deben alimentar con el adaptador de señal, el cual además de alimentar los acelerómetros, acondiciona la señal para su posterior lectura por un osciloscopio. El osciloscopio que realiza esta medida es el modelo DPO2014B de *Tektronix* [7], el cual ha sido elegido por la posibilidad de conexión serie con un PC a través de Python. Esta conexión se gestiona bajo el estándar VISA [2], protocolo que nos permite la comunicación entre Python y el osciloscopio, gracias al módulo *pyVISA* [1]. Mediante el módulo *PyVISA* es posible recoger en un entorno Python las señales de los acelerómetros muestreadas a alta frecuencia (130 kHz).

Mediante un script se acciona el percutor, enviando la orden por el puerto serie, se capturan los

datos mediante el módulo *pyVISA* y se guardan en un fichero JSON, el cual almacena los ensayos realizados con distintas configuraciones de la bancada como datos de entrenamiento para futuros análisis. El nombre de este fichero se corresponde con la configuración de la bancada en el momento del ensayo y con el instante de tiempo que se inició el ensayo.

3. EXPERIMENTO Y RESULTADOS

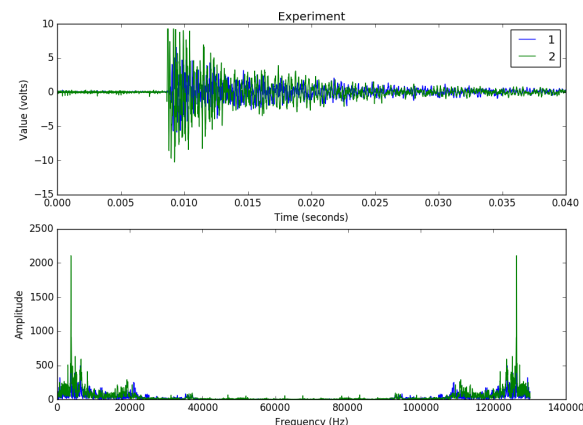


Figura 5: Evolución temporal de un ensayo (arriba) y su espectro (debajo).

Para probar la validez del diseño propuesto, se realizó un experimento preliminar en el que se puede ver reflejadas la mayoría de las características del paradigma de reconocimiento estadístico de patrones. Con este pequeño experimento se pretende acotar las ventajas y las limitaciones del diseño (estructura, sistema de excitación) y de la metodología empleada para la captura de los datos.

En la figura 5 se representa la adquisición de uno de los ensayos de entrenamiento en la que se pueden ver las señales de respuesta de los dos sensores en el momento del impacto (arriba) y la representación de su transformada de Fourier (debajo).

3.1. EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS

Tras la captura de los datos de entrenamiento se procede a la extracción de características, mediante otro script, el cual lee los datos de entrenamiento capturados y realiza el procesamiento. Para ello, se extraen las características de las señales de vibraciones medidas por los acelerómetros en bandas de frecuencia determinadas, generando un vector de características, que contiene las energías en dichas bandas, para varios instantes de tiempo. Este vector, por tanto, describe la evolución

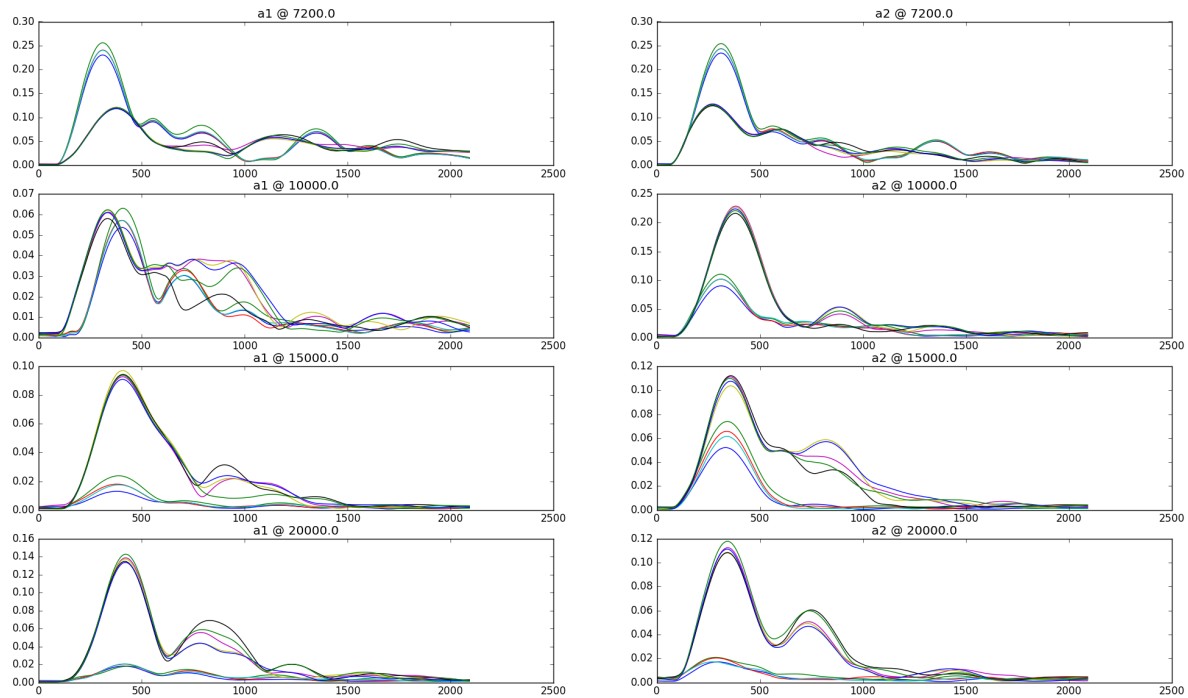


Figura 6: Evolución temporal de los armónicos de los dos sensores (en ambas columnas) a las frecuencias 7200, 10000, 15000, 20000 Hz.

temporal de los armónicos del sistema, constituyendo una expresión tiempo-frecuencia del estado dinámico de vibración, que contiene información detallada sobre su condición estructural.

Para el procesamiento de los datos se extraen las características de los acelerómetros en unas bandas de frecuencia determinadas. Los rangos de estas bandas de frecuencia son de 10 Hz y las frecuencias elegidas experimentalmente son de 7200, 10000, 15000, 20000 Hz. El tamaño de ventana elegida fue de 1024. Posteriormente se remuestrea el resultado de manera que se obtienen 21 valores en cada frecuencia elegida para ambos acelerómetros. En la figura 6 se puede ver el procesado en estas frecuencias para las señales de los dos acelerómetros correspondientes a varios ensayos recogidos en la bancada. El color de las líneas se refiere a cada uno de los ensayos mostrados.

3.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO: PROYECCIÓN PCA DE LOS ENSAYOS

Se propone como método de análisis una proyección de los datos en un plano, utilizando una de las técnicas de reducción de la dimensión más populares, el análisis de componentes principales (*prin-*

cipal component analysis, PCA), la cual encuentra combinaciones lineales ortogonales con mayor varianza en los datos. Para ello se hace un escalado previo de los datos para que los valores se encuentren dentro de unos rangos determinados.

Los datos, recogidos a modo de ejemplo, se dividen en un grupo de entrenamiento y otro grupo que simula nuevos ensayos de test. Los estados en la estructura recogidos en los datos capturados consisten en una situación normal, con todos los tornillos apretados, y otra situación con uno de los tornillos aflojado. Como se ha descrito en el anterior apartado, se extraen las características con 21 valores de 4 bandas de frecuencia para los 2 acelerómetros y se formatean en un único vector de manera que cada punto contiene un total de 168 valores. En la figura 7 se puede ver la proyección PCA resultante de un grupo de ensayos realizados de manera continuada. Se observa la separación clara de ambas situaciones de la estructura y que la proyección de los registros reservados para el test se sitúan en la zona del mapa correspondiente a la del estado de la estructura en el momento en el que se midieron.

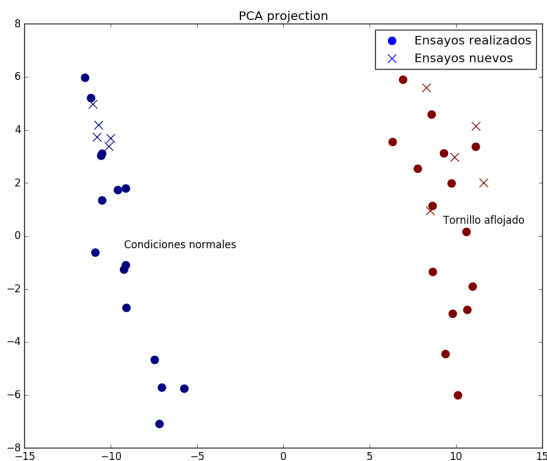


Figura 7: Proyección PCA. Círculos datos de entrenamiento, cruces datos de test. Color azul estado normal de la estructura y rojo estado de fallo (tornillo aflojado).

4. LIMITACIONES

A continuación se describen algunas limitaciones que se han identificado durante el desarrollo del sistema propuesto. La lógica inversa en el funcionamiento del percutor hace que la bobina se encuentre energizada en todo momento salvo en el momento de realizar un impacto, que es cuando se libera. Esto produce un calentamiento en el percutor que puede limitar su uso de manera continua y prolongada.

La variabilidad en los datos recogidos podría afectar a la repetibilidad de los ensayos en diferentes situaciones de la estructura. La adquisición se realiza tras una captura del osciloscopio que se dispara cuando una de las señales supera un umbral determinado. Para la realización de una adquisición continua de datos, se puede utilizar una tarjeta de adquisición cuyas salidas podrían incluso utilizarse para accionar el sistema de excitación, el cual podría constar de un dispositivo más avanzado utilizado por profesionales como los *shakers* electrodinámicos.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se describe la construcción de una bancada de ensayos para la monitorización de salud estructural. Esto permite la realización de diferentes experimentos por medio de una excitación de la estructura, la adquisición y el análisis de las señales de vibraciones en el dominio de la frecuencia y su visualización en un mapa 2D utilizando una técnica de reducción de la dimensión.

El montaje realizado incluye un sistema de excitación, accionado vía software, que provoca un impacto en la estructura, excitándola y recogiendo su respuesta modal mediante un osciloscopio conectado a un ordenador. El procesamiento de los datos consiste en la construcción de una matriz de datos cuyos atributos contienen las energías de la respuesta en determinadas bandas de frecuencia. Mediante un análisis de componentes principales se proyectan los puntos de ensayos en un mapa, en el cual pueden compararse con la proyección de otros puntos que definen diferentes ensayos de entrenamiento cubriendo diferentes situaciones de ejemplo que se pueden dar en la estructura.

Este montaje proporciona un excelente escenario en la adquisición de datos de ensayos reales para el estudio y validación de algoritmos aplicados en la monitorización de salud estructural. Como trabajo futuro quedarían tareas como tratar el calentamiento que se produce en el sistema de excitación, una organización modular del software que permita programar diferentes grupos de ensayos de manera automática o la estandarización de los datos recogidos añadiendo metadatos como el tipo de excitación, los defectos o fallos simulados. Otro aspecto que incrementaría el valor de nuestro banco de ensayos sería la implementación de un servicio remoto que permita al usuario realizar ensayos a través de una página web, aumentado de esta manera la flexibilidad y el acceso a los datos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO), Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) “Una manera de hacer Europa”, bajo el proyecto de referencia DPI2015-69891-C2-2-R y por el Gobierno del Principado de Asturias a través del programa “Severo Ochoa” de ayudas predoctorales para la investigación y docencia del Principado de Asturias.

Referencias

- [1] Documentación pyvisa. <https://pyvisa.readthedocs.io/en/stable/>. Accessed: 2017-03-23.
- [2] Ivi foundation page. <http://www.ivifoundation.org/specifications/default.aspx>. Accessed: 2017-03-20.
- [3] Md22 datasheet. <https://www.robot-electronics.co.uk/htm/md22tech.htm>. Accessed: 2017-02-09.

- [4] Página oficial arduino mega. <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega>. Accessed: 2017-06-09.
- [5] Página oficial python. <https://www.python.org/>. Accessed: 2017-03-23.
- [6] Shm data sets and software. <http://www.lanl.gov/projects/national-security-education-center/engineering/software/shm-data-sets-and-software.php>. Accessed: 2017-06-07.
- [7] Tektronik dpo2014b. <http://www.tek.com/oscilloscope/mso2000-dpo2000>. Accessed: 2017-03-20.
- [8] D. E. Bently and T. Hatch'Charles. Fundamentals of rotating machinery diagnostics. *Mechanical Engineering-CIME*, 125(12):53–54, 2003.
- [9] E. P. Carden and P. Fanning. Vibration based condition monitoring: a review. *Structural health monitoring*, 3(4):355–377, 2004.
- [10] I. Díaz, A. A. Cuadrado, A. B. Díez, and M. Domínguez. Manifold learning for visualization of vibrational states of a rotating machine. In *ICANN (2)*, pages 285–292, 2011.
- [11] I. Díaz Blanco, M. Domínguez González, A. A. Cuadrado, and J. J. Fuertes Martínez. A new approach to exploratory analysis of system dynamics using som. applications to industrial processes. *Expert Systems With Applications*, 34(4):2953–2965, 2008.
- [12] S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime, and others. A summary review of vibration-based damage identification methods. *Shock and vibration digest*, 30(2):91–105, 1998.
- [13] C. R. Farrar, S. W. Doebling, and D. A. Nix. Vibration-based structural damage identification. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 359(1778):131–149, 2001.
- [14] C. R. Farrar and K. Worden. An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851):303–315, 2007.
- [15] Hoon Sohn. Effects of environmental and operational variability on structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851):539–560, 2007.
- [16] D. Pérez, F. García-Fernández, I. Díaz, A. Cuadrado, D. Ordonez, A. Díez, and M. Domínguez. Visual analysis of a cold rolling process using a dimensionality reduction approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(8):1865–1871, 2013.
- [17] A. Rytter. *Vibrational based inspection of civil engineering structures*. PhD thesis, Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, 1993.

CONTROL DE UN VEHÍCULO CUATRIRROTOR BASADO EN REDES NEURONALES

Jesús Enrique Sierra
Universidad Complutense de Madrid, jesier01@ucm.es

Matilde Santos
Universidad Complutense de Madrid, msantos@ucm.es

Resumen

En este trabajo se propone una estrategia de control neuronal adaptativa para estabilizar un vehículo aéreo no tripulado (UAV). Se estudia la influencia de la masa del cuatrirrotor y de las perturbaciones. Los resultados muestran cómo el aprendizaje online hace más robusto el control, minimizando los efectos de las variaciones en la masa y de las perturbaciones externas en la altura.

Palabras Clave: Control neuronal, aprendizaje online, redes neuronales, vehículos aéreos no tripulados (UAV), cuatrirrotor.

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años han surgido nuevas y valiosas aplicaciones de los vehículos aéreos no tripulados en diferentes sectores como: defensa, seguridad, construcción, agricultura, lucha contra incendios, entretenimiento, mensajería, etc, que demandan el diseño de controladores eficientes y robustos que soporten estas u otras aplicaciones. Por ello el modelado y el control de estos sistemas inestables y complejos siguen motivando la investigación y el interés de la comunidad científica [1].

La modelización y el control de un vehículo aéreo no tripulado, UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), no es una tarea sencilla. Su complejidad proviene de diferentes fuentes: la aleatoriedad de los flujos de aire y de las fuerzas exógenas, la fuerte no linealidad de la dinámica del mismo, los acoplamientos en su dinámica, la incertidumbre de las medidas,... Estos factores convierten a las técnicas basadas en la inteligencia artificial en un camino prometedor para la identificación y el control de estos sistemas.

Estas técnicas resultan especialmente útiles cuando se producen modificaciones en parámetros del modelo mientras el sistema está en funcionamiento. Por ejemplo, variaciones en la masa total del sistema en los vehículos que se emplean en tareas logísticas,

donde la masa depende en cada momento de la paquetería que están transportando.

Existen otros trabajos que han aplicado redes neuronales al modelado de estos sistemas [2, 3] y también para el control [4, 5]. También se pueden encontrar ejemplos de la aplicación de estas técnicas inteligentes para modelar otros sistemas complejos no lineales [6], por ejemplo, vehículos marinos [7].

En este trabajo se propone una estrategia de control neuronal adaptativa para estabilizar un vehículo aéreo no tripulado (UAV). Se estudia la influencia de la masa del cuatrirrotor y de las perturbaciones. Los resultados muestran cómo el aprendizaje online hace más robusto el control, minimizando los efectos de las variaciones en la masa y de las perturbaciones externas en altura.



Figura 1: Vehículo cuatrirrotor.

La organización del documento es la siguiente. En la sección 2 se exponen las ecuaciones que describen el comportamiento dinámico del UAV. La sección 3 se destina al estudio de la estrategia de control neuronal adaptativa implementada. Los resultados son discutidos y comparados en la sección 4. El documento finaliza con las conclusiones y trabajos futuros.

2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Un vehículo cuatrirrotor consta de cuatro brazos perpendiculares, cada uno de ellos con un motor y un rotor (figura 1). Los cuatro motores proporcionan

propulsión para el control de la sustentación así como el control de la dirección. El sistema consiste en dos pares de rotores opuestos entre sí: (1,3) y (2,4) (Figura 2). Para que esté balanceado un par gira hacia la derecha mientras que el otro gira hacia la izquierda. Un incremento de la velocidad del rotor 3 frente al rotor 1 produce un pitch positivo ($\theta > 0$), mientras que un incremento de velocidad del rotor 4 frente al 2, produce un roll positivo ($\phi > 0$) (Figura 2).

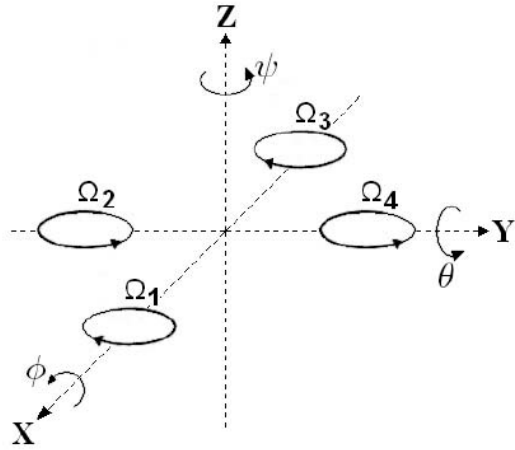


Figura 2: Sistema de coordenadas del UAV.

La posición absoluta es descrita por tres coordenadas (x, y, z) y su orientación por los tres ángulos de Euler (ϕ, θ, ψ), bajo las condiciones ($-\pi \leq \psi < \pi$) para el yaw, ($\frac{\pi}{2} \leq \phi < \frac{\pi}{2}$) para el roll y ($\frac{\pi}{2} \leq \theta < \frac{\pi}{2}$) para el pitch.

Usando el método de Newton-Euler la dinámica angular del sistema puede expresarse como:

$$\tau = J\dot{\omega} + \omega \times J\omega \quad (1)$$

$$J = \begin{pmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

Donde τ es un vector de pares a lo largo de los tres ejes, J es el tensor de inercia, ω es un vector de velocidades angulares y \times denota el producto vectorial.

La dinámica de traslación se rige por la ecuación:

$$m\dot{v} = RT - mge_3 \quad (3)$$

Donde m es la masa del cuatrirotor, R es la matriz de rotación, g es la aceleración de la gravedad, T es el vector de fuerzas y $e_3 = [0,0,1]^T$ es un vector unitario que describe la orientación del rotor.

Los vectores τ y T , vienen dados por las velocidades de giro de los rotores:

$$\tau = \begin{pmatrix} bl(\Omega_4^2 - \Omega_2^2) \\ bl(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) \\ d(\Omega_2^2 + \Omega_4^2 - \Omega_1^2 - \Omega_3^2) \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$T = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \end{pmatrix} \quad (5)$$

En las ecuaciones 4 y 5, b es el coeficiente de empuje, d es el coeficiente de arrastre y l es la longitud de cada brazo; $\Omega_1, \dots, \Omega_4$ son las velocidades de los rotores 1 a 4, respectivamente.

Para simplificar, en vez de utilizar las velocidades de los rotores se pueden utilizar las señales de control u_1, u_2, u_3 y u_4 , que se obtienen de la transformación:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_1^2 \\ \Omega_2^2 \\ \Omega_3^2 \\ \Omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Esta matriz es invertible por lo que a partir de señales de control pueden generarse consignas de velocidad de los rotores.

Usando las ecuaciones 1 a 6, se llega al siguiente sistema de ecuaciones:

$$\ddot{\phi} = \dot{\theta}\dot{\psi}(I_y - I_z)/I_x + (lb/I_x)u_2 \quad (7)$$

$$\ddot{\theta} = \dot{\phi}\dot{\psi}(I_z - I_x)/I_y + (lb/I_y)u_3 \quad (8)$$

$$\ddot{\psi} = \dot{\phi}\dot{\theta}(I_x - I_y)/I_z + (d/I_z)u_4 \quad (9)$$

$$\ddot{X} = -(\sin\theta\cos\phi)(b/m)u_1 \quad (10)$$

$$\ddot{Y} = (\sin\phi)(b/m)u_1 \quad (11)$$

$$\ddot{Z} = -g + (\cos\theta\cos\phi)(b/m)u_1 \quad (12)$$

Las constantes empleadas para las simulaciones (Tabla 1) se han extraído de [8].

Tabla 1: Constantes empleadas en el modelo.

Parámetro	Descripción	Valor
l	longitud	0.232 m
m	Masa del cuatrirotor	0.52 Kg
d	Coeficiente de arrastre	$7.5e-7$ N m s ²
b	Coeficiente de empuje	$3.13e-5$ N s ²
I_x	Inercia en X	$6.228e-3$ Kg m ²
I_y	Inercia en Y	$6.225e-3$ Kg m ²
I_z	Inercia en Z	$1.121e-2$ Kg m ²

3 DESCRIPCIÓN DEL CONTROLADOR NEURONAL

3.1 ESTRATEGIA DE CONTROL

Existen diferentes estrategias a la hora de emplear las redes neuronales para controlar sistemas. En este caso hemos empleado una variante de la estrategia de aprendizaje generalizado (GLA), refinando la red en tiempo real mediante un aprendizaje adaptativo [9].

En una primera fase se aplica la estrategia de aprendizaje generalizado, entrenando la red offline para identificar la inversa de la planta (Figura 3).

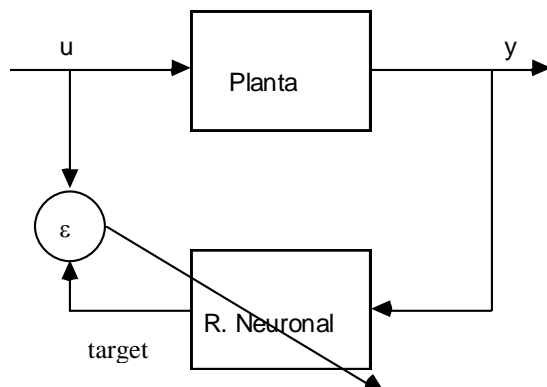


Figura 3: Fase de entrenamiento offline para identificación de la planta.

La red neuronal que sirve de controlador debe actuar como la inversa de la planta, es decir, que a partir de la respuesta deseada (la señal de referencia r) calcule la señal de control u que conduzca a la salida real del sistema y a la señal de referencia.

Una vez que la red se ha entrenado offline, se coloca la red en cascada con la planta. Después se refina la configuración de la red online. Para ello, en cada intervalo de control se ejecutan secuencialmente dos procesos en la red:

1. **Simulación:** A partir de la referencia de entrada se obtiene la salida u que se lleva a la planta a la referencia (Figura 4, conmutador en la posición superior).
2. **Aprendizaje:** A partir de las salidas de la planta y anteriores se entrena la red neuronal para generar la salida de control u . (Figura 4, conmutador en la posición inferior).

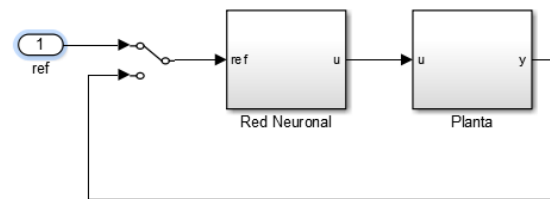


Figura 4: Fase de control + aprendizaje online.

3.2 CONTROL DE ALTITUD

Para comprobar la validez de la técnica nos hemos centrado en la regulación de la altitud. Los cuatrirtores normalmente vienen equipados con acelerómetros, por lo que se supone medible la aceleración en el eje Z (\ddot{Z}).

En este caso, la red debe ser capaz de simular la señal de control u_1 a partir de las medidas de aceleración. El conjunto de datos de entrada de la red se forma, en cada instante de tiempo t , con el valor de la señal de control u_1 en los 10 instantes de muestreo anteriores, $u_1(t - iT_s)$ donde $i = 1 \dots 10$, y T_s es tiempo de muestreo, y el valor de la aceleración del eje Z en el instante actual $\ddot{Z}(t)$. El conjunto de datos objetivo se ha generado con el valor de la señal de control u_1 en el instante actual $u_1(t)$. El T_s empleado en los experimentos ha sido 10ms.

Para controlar la altura Z se añade un controlador PID que genera las consignas necesarias de aceleración en el eje Z . La figura 5 refleja el sistema de control completo propuesto.

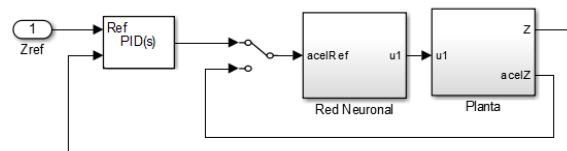


Figura 5: Controlador de altitud propuesto.

Para entrenar la red durante la fase offline se generan trenes de pulsos de amplitud variable durante 4 segundos. Previamente al entrenamiento los conjuntos de entrada y salida son normalizados para ajustar el rango a 0-1. La aplicación de esta técnica en un sistema real, requeriría la supervisión de los pulsos por un piloto, quién se encargaría de ajustar las amplitudes para no deteriorar el sistema.

En el estudio se ha empleado como red neuronal un perceptrón multicapa (MLP) con 5 capas ocultas (Figura 6). El algoritmo de optimización empleado ha sido el Levenberg-Marquardt con $\mu = 0.001$.

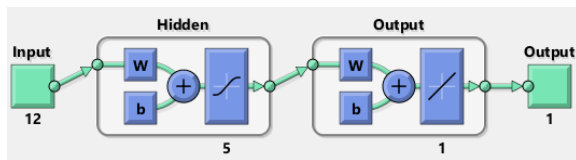


Fig. 6. Esquema de la red neuronal empleada.

En la figura 7 puede apreciarse cómo la salida de la red se aproxima de una manera bastante fiel a la dinámica inversa de la planta tras el entrenamiento offline.

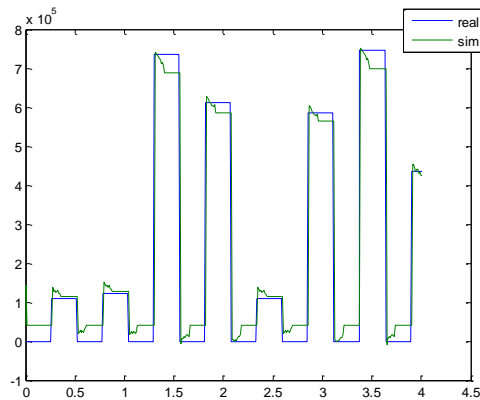


Figura 7: Entrenamiento offline de la red

4 RESULTADOS

Los resultados que se presentan se han obtenido mediante simulación empleando el software Matlab/Simulink. Las simulaciones duran 15 segundos; durante los 4 primeros se entrena el controlador offline y en los restantes 11 segundos se aplica el aprendizaje, introduciendo al controlador como entrada la consigna Zref.

En la figura 8 puede observarse el comportamiento de las distintas fases del controlador. En el eje x se representa el tiempo y en el eje y se representan: la aceleración en Z del sistema (en azul), la consigna de aceleración generada por el controlador una vez entrenado (en verde), y la altitud (en rojo).

Hasta el segundo 4 el controlador está siendo entrenado. Por este motivo, la gráfica en verde vale 0 ese instante. Las señales de control que se emplean para entrenar al controlador provocan que la altitud del sistema varíe. En el instante $t = 4$, el controlador deja de ser entrenado y pasa a la fase de control. En ese momento se fija el valor 2 como referencia para la altura Z. Se empiezan a generar consignas de aceleración para estabilizar la altitud en torno a ese valor. En esta figura 8 también es interesante ver que las señales accelRef (entrada de la red neuronal) y accelZ (salida del sistema) se parecen cada vez más conforme pasa el tiempo gracias al aprendizaje online.

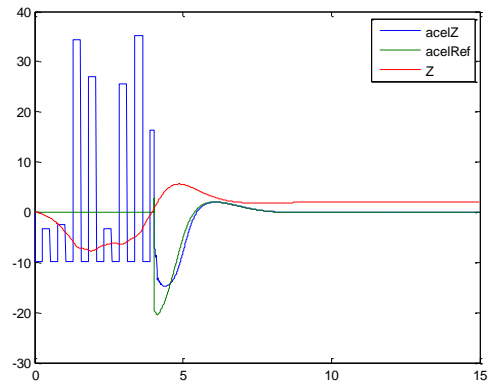


Figura 8: Fases del controlador de altitud propuesto.

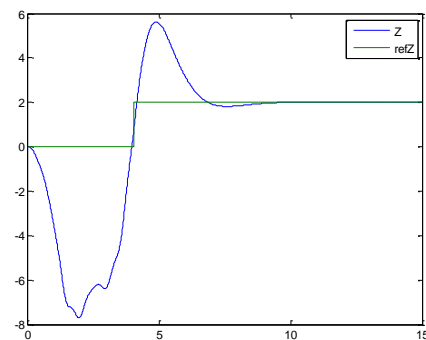


Figura 9: Altitud con aprendizaje online.

En la figura 9 se muestra en azul la altura real del UAV y en verde la referencia. Puede apreciarse como el controlador consigue estabilizar la señal de altitud entorno al valor deseado.

Estos resultados podrían extenderse al control de los tres ángulos de Euler del UAV, para el seguimiento de una trayectoria.

4.1 VARIACIÓN DE LA MASA DEL SISTEMA

Se simula ahora el sistema introduciendo un cambio en la masa (se duplica) del cuatrirotor en el instante 6. Puede observarse en las figuras 10 y 11 cómo el sistema con aprendizaje online consigue aproximar la referencia (verde) mientras que en el sistema sin aprendizaje el error estacionario es notable.

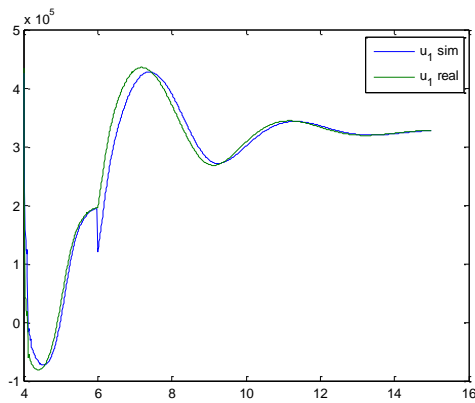


Fig. 10. Simulación de la señal de control u_1 con aprendizaje online y variación de la masa.

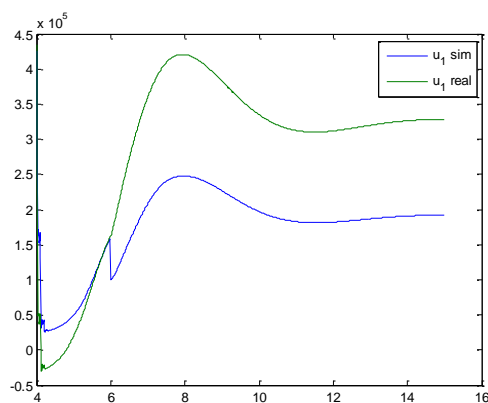


Fig. 11. Simulación de la señal de control u_1 sin aprendizaje y variación en masa.

La figura 12 representa la referencia de altitud (en verde) y las señales de altitud con y sin aprendizaje online (azul y rojo respectivamente). El error en la salida de la red neuronal mostrado en la figura 11 se traduce en una peor respuesta a un escalón en la altura. En este caso aumenta el sobreimpulso y el error estacionario es grande.

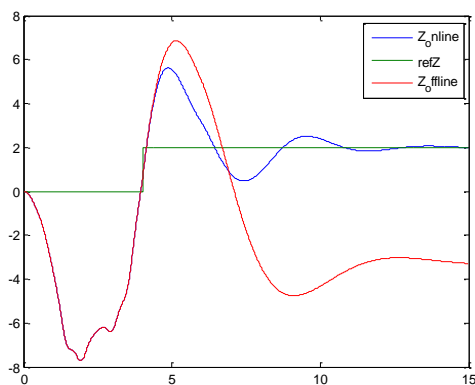


Fig. 12. Comparación del control de altitud con y sin aprendizaje online ante una perturbación.

4.2 INFLUENCIA DE PERTURBACIONES EXTERNAS

El efecto de una perturbación en la ecuación 12 se ha introducido como:

$$\ddot{Z} = -pert - g + (\cos\theta\cos\phi)(b/m)u_1 \quad (13)$$

En esta simulación se aplica una perturbación de 9.8 m/s^2 en el instante 6. Puede observarse en las figuras 13 y 14 cómo el sistema con aprendizaje online consigue aproximar la referencia (en verde) sin error apreciable mientras que en el sistema sin aprendizaje adaptativo produce error estacionario.

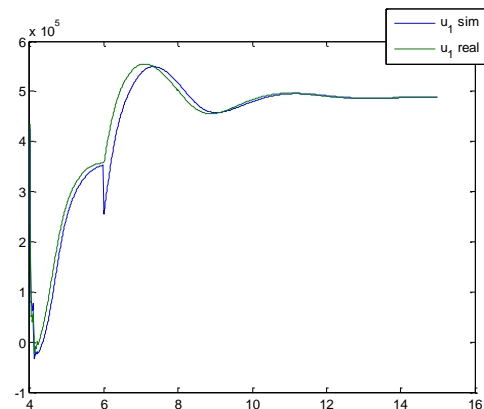


Fig. 13. Simulación de la señal de control u_1 con aprendizaje online y perturbación externa.

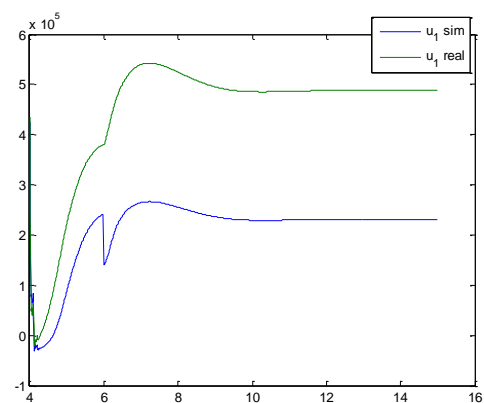


Fig. 14. Simulación de la señal de control u_1 sin aprendizaje online y perturbación externa.

La figura 15 representa la referencia de altitud (en verde) y la altura del UAV con y sin aprendizaje online (azul y rojo, respectivamente). El error en la salida de la red neuronal observable en la figura 14 se traduce en una peor respuesta a un escalón. En este caso aumenta el sobreimpulso y el error estacionario es mayor que en el caso de variación de la masa (Figura 12).

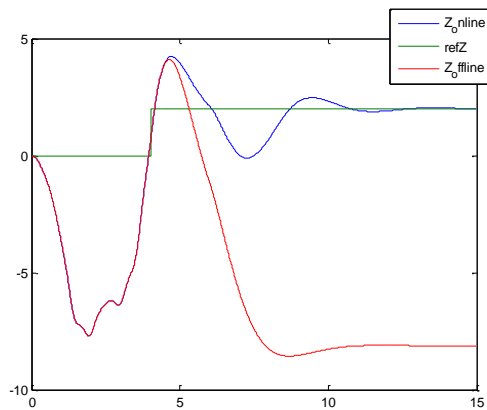


Fig. 15. Comparación del control de altitud con y sin aprendizaje online ante una perturbación.

5 CONCLUSIONES

Los UAV son sistemas complejos de modelar y controlar. La dificultad estriba en la aleatoriedad de las perturbaciones y en su dinámica fuertemente no lineal.

En este trabajo se ha mostrado cómo la aplicación de una técnica de la Inteligencia Artificial, en concreto las redes de neuronas artificiales, se pueden aplicar para diseñar un sistema de control neuronal que sea eficiente.

Se ha validado la propuesta en simulación para el control de la altura de un UAV. Se ha mostrado cómo el aprendizaje adaptativo de la red (online) permite un control capaz de hacer frente a variaciones en la masa del sistema o a perturbaciones externas constantes en la aceleración.

Como trabajos futuros se plantean, por un lado, controlar el sistema completo para considerar los acoplamientos entre sus variables y, por otro, añadir modelos más realistas de perturbaciones.

Agradecimientos

El autor J.E. Sierra agradece a la empresa ASTI la financiación de la presentación de este trabajo en las Jornadas de Automática 2017.

Referencias

- [1] Zulu, A., & John, S. (2016). A review of control algorithms for autonomous quadrotors. arXiv preprint arXiv:1602.02622
- [2] Sierra, J.E. & Santos, M. (2017). Modeling engineering systems using analytical and neural techniques: hybridization. Neurocomputing,.

- [3] Bansal, S., Akametalu, A. K., Jiang, F. J., Laine, F., & Tomlin, C. J. (2016). Learning quadrotor dynamics using neural network for flight control. In: Decision and Control (CDC), 2016 IEEE 55th Conf. on (pp. 4653-4660).
- [4] Boudjedir, H., Bouhali, O., & Rizoug, N. (2014). Adaptive neural network control based on neural observer for quadrotor unmanned aerial vehicle. Advanced Robotics, 28(17), 1151-1164.
- [5] Bakshi, N. A., & Ramachandran, R. (2016). Indirect model reference adaptive control of quadrotor UAVs using neural networks. In: Intelligent Systems and Control (ISCO), 2016 10th Int. Conf. on (pp. 1-6).
- [6] Santos, M. (2011). Aplicaciones Exitosas de Control Inteligente a Casos Reales. Science Direct, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial.
- [7] Santos, M., López, R., & De La Cruz, J. M. (2006). A neuro-fuzzy approach to fast ferry vertical motion modelling. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 19(3), 313-321.
- [8] S. Bouabdallah, S. and Siegwart, R. (2006) Advances in Telerobotics, chapter Towards Intelligent Miniature Flying Robots, pp. 429-440.
- [9] Wise, K. A., Lavretsky, E., & Hovakimyan, N. (2006, June). Adaptive control of flight: theory, applications, and open problems. In American Control Conference, 2006 (pp. 6-pp). IEEE.

CONTROL PREDICTIVO FUZZY CON APLICACIÓN A LA DEPURACIÓN BIOLÓGICA DE FANGOS ACTIVADOS

Pedro M. Vallejo Llamas (pedrito@usal.es)
Dpto. de Informática y Automática. Universidad de Salamanca.
Plaza de los Caídos s/n, 37008 Salamanca.

Pastora Vega Cruz (pvega@usal.es)
Dpto. de Informática y Automática. Universidad de Salamanca.
Plaza de los Caídos s/n, 37008 Salamanca

Resumen

El trabajo que aquí se presenta se sitúa en el ámbito del Control Predictivo No Lineal, tomando como base de las predicciones un modelo fuzzy del proceso (FMBPC), obtenido mediante identificación a partir de datos de entrada y salida. En nuestro caso, siguiendo una línea particular introducida previamente por otros autores, tal modelo es tratado adecuadamente para poder expresarlo en forma de ecuaciones de estado, más comprensibles y manejables. Y utilizando estas ecuaciones para el cálculo de las predicciones, junto con la restricción del seguimiento de una trayectoria de referencia, se deducirá una expresión analítica expresa para la Ley de Control. El enfoque elegido reúne dos posibles ventajas, según diversos autores: la idoneidad de los esquemas de control predictivo basados en modelos fuzzy para controlar procesos con una dinámica fuertemente no lineal, por un lado, y la claridad y concreción del procedimiento numérico de obtención de la ley de control predictivo de una manera analítica, frente a los procedimientos basados en optimización. En este artículo se estudia la aplicación de esta estrategia al control de un proceso biológico de depuración de fangos activados, un proceso fuertemente no lineal y multivariable, realizando diversos experimentos de Control Predictivo basado en modelos Fuzzy (FMBPC), mediante simulación.

Palabras Clave: control predictivo, modelo no lineal, identificación fuzzy, espacio de estados, ley de control analítica, depuración de fangos activados.

1 INTRODUCCIÓN

El conjunto de estrategias agrupadas bajo la denominación de *Control Predictivo basado en Modelos (MBPC)* [4], constituye una de las alternativas más consolidadas en control de procesos industriales (normalmente multivariables y con restricciones), frente a los esquemas clásicos de

control. Existen numerosas variantes dentro de este grupo, entre ellas las basadas en modelos no lineales del proceso a controlar (*Control Predictivo No Lineal*). De forma abreviada, podemos decir que la estrategia de *Control Predictivo* consiste, en esencia, en la utilización de un modelo del proceso (*modelo de predicciones*) para poder determinar las acciones de control idóneas en cada instante, imponiendo la minimización de alguna función de coste (dependiente del error y generalmente también de los esfuerzos de control, entre otras posibles variables). No existe, sin embargo, una única estrategia de control predictivo, abarcando esta denominación a un amplio conjunto de estrategias que coinciden en el método de determinación de la ley de control que acabamos de describir, pero que admite muchas variantes, dependiendo de varios factores, principalmente del tipo de modelo utilizado para calcular las predicciones y del algoritmo matemático empleado para determinar la ley de control. Dependiendo de la naturaleza del modelo de predicciones (lineal o no lineal), podemos clasificar estas estrategias en dos grandes grupos: *Control Predictivo Lineal* y *Control Predictivo no Lineal*. El segundo grupo está integrado por los métodos que utilizan modelos matemáticos no lineales, como modelos de tipo Fuzzy [12], modelos formalizados mediante Redes Neuronales Artificiales u otras alternativas (...). El presente trabajo pertenece al conjunto de estrategias de control predictivo basadas en modelos no lineales y más concretamente en modelos fuzzy [2, 7 y 9]. En relación con la determinación de la variable de control, la mayoría de las estrategias (tanto con modelo lineal, como con modelo no lineal) utilizan algún tipo de algoritmo matemático de optimización (imponiendo la minimización de alguna función de coste). Sin embargo, en nuestro trabajo tal cálculo no se hace mediante optimización, sino que se lleva a cabo de forma analítica y explícita, que constituye una interesante alternativa.

El modelo de predicciones elegido en este trabajo es

un modelo fuzzy de tipo *Takagi-Sugeno* [10], en el cual las premisas de las reglas son expresiones lógicas difusas relativas a los antecedentes de las reglas, mientras que las conclusiones son combinaciones lineales numéricas de los consecuentes de tales reglas. Los modelos fuzzy son muy apropiados para describir sistemas no lineales, pero existe quizás cierta dificultad a la hora de utilizar las relaciones matemáticas fuzzy y por ello se han formalizado las expresiones del modelo con un formato similar al de las Ecuaciones de Estado, obteniendo así un modelo matemático expresado de manera analítica. Haciendo uso del mismo podremos *despejar* la variable de control que garantice, para cada instante de muestreo, el objetivo de seguimiento deseado. Así, dispondríamos de la variable de control expresada de manera analítica y explícita. Este método podría considerarse una extensión al caso de los sistemas no lineales del denominado *Predictive Functional Control (PFC)*, ideado inicialmente para sistemas lineales.

La estrategia de control predictivo considerada en el presente artículo ha sido abordada antes por otros autores. Más concretamente, en [3] se desarrolla para un caso de estudio con una entrada manipulable y una única salida controlada y sin considerar perturbaciones. En este artículo, sin embargo, se aborda un caso de estudio en el que el proceso es multivariable y se consideran perturbaciones en la entrada del mismo. Se trata de un proceso biológico de depuración de fangos activados en el que se han considerado tres entradas y dos salidas. De las tres entradas, únicamente una de ellas es manipulable y las otras dos son perturbaciones. Y el objetivo es controlar simultáneamente ambas salidas. El modelo fuzzy de predicciones se expresará, como hemos dicho anteriormente, en forma de ecuaciones en el espacio de estados. Estas ecuaciones serán matriciales debido al carácter multivariable del proceso y, por otra parte, tendrán la importante particularidad de que los coeficientes de los distintos términos no serán constantes, puesto que, tras la correspondiente formalización matemática, resultan dependientes del vector premisa instantáneo (más concretamente, de los grados de cumplimiento del vector premisa respecto de las diferentes reglas, en cada instante) y por tanto, en última instancia, dependientes del instante de muestreo, siendo necesario por tanto que tales coeficientes sean actualizados (recalculados) en cada período de tiempo. La existencia de dos perturbaciones y una única entrada manipulada, supone que no será fácil controlar el proceso. Sobre todo, teniendo en cuenta que el proceso considerado es de tipo biológico, fuertemente no lineal y bastante más impredecible

que muchos procesos industriales fisicoquímicos. Abordar un caso de estudio con todas estas complejidades constituye precisamente una de las principales aportaciones del presente artículo.

2 CASO DE ESTUDIO

Nuestro caso de estudio consiste en una planta depuradora de aguas residuales (*EDAR*) con tratamiento biológico de depuración mediante fangos activados, simplificada a efectos de estudio. En la figura siguiente (Fig. 1) puede verse el diagrama de bloques entrada/salida del sistema elegido, con las distintas variables implicadas y en la Tabla 1 se muestra, organizada, toda la información relativa a las distintas entradas y salidas consideradas:

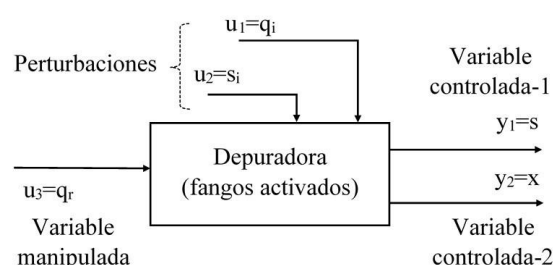


Figura 1: Sistema biológico multivariable (diagrama de bloques entrada/salida)

Tabla 1: Entradas y salidas de la depuradora

Entradas	u_1	Perturbaciones	Caudal de agua entrante	q_i
	u_2		Concentración de sustrato entrante	s_i
	u_3	Variable Manipulada	Caudal de recirculación de fangos activados	q_r
Salidas	y_1	Variable Controlada 1	Concentración de sustrato saliente	s
	y_2	Variable Controlada 2	Concentración de biomasa saliente	x

En la depuradora, la eliminación de los contaminantes orgánicos o *sustrato* corre a cargo de la denominada *biomasa*, que son poblaciones de microorganismos que se alimentan de los contaminantes, reaccionando con ellos en presencia de oxígeno, depurando así el agua y generando como subproducto los denominados fangos activados, que son separados mediante sedimentación en el decantador secundario. Una de las principales acciones de control de este tipo de procesos es, precisamente, la recirculación de tales fangos (los

cuales contienen microorganismos digestores), desde el decantador secundario hacia el reactor biológico aerobio, para mantener en un cierto nivel la concentración de microorganismos en el reactor. Y, por supuesto, también influirá en la evolución del proceso de depuración, el grado de aireación en el reactor, acción que se realiza para suministrar el oxígeno que necesitan las reacciones aerobias entre bacterias y contaminantes orgánicos. En nuestro caso, no obstante, y por razones de simplificación, hemos considerado como única variable manipulada el caudal de recirculación de fangos (q_r), considerando constante, y con un valor adecuado, el grado de aireación.

El modelo matemático del proceso de depuración utilizado es una simplificación del modelo estándar denominado *Activated Sludge Model No.1*, más conocido por sus siglas en inglés: *ASM1* [6]. La simplificación ha consistido en lo siguiente: por un lado, hemos considerado una planta depuradora con un único reactor aeróbico seguido de un decantador secundario y, por otro, se han considerado únicamente los balances de masa correspondientes al sustrato y a la biomasa (no se ha considerado el del oxígeno). La estructura de la planta y las ecuaciones del modelo considerado pueden verse en [5], teniendo en cuenta la limitación mencionada en cuanto a número de reactores y considerando únicamente la parte del modelo relativa al sustrato y a la biomasa.

3 MODELADO FUZZY

En nuestro caso de estudio, el modelado fuzzy constituye una buena alternativa, entre otras posibles, por su potencialidad para capturar dinámicas no lineales. La primera etapa de nuestro trabajo consistió en diseñar y llevar a cabo un proceso de identificación con el objetivo de obtener un modelo fuzzy para el proceso de depuración. La identificación se llevó a cabo partiendo de series de datos numéricos de entrada-salida, determinando previamente las salidas mediante simulación en lazo abierto (con la depuradora representada por su modelo matemático clásico no lineal en forma de ecuaciones diferenciales [5]). Los datos disponibles fueron procesados mediante la herramienta-software de identificación denominada *FMID* (*Fuzzy Model Identification Toolbox*) [1], junto con algunas adaptaciones y complementos de código que programamos en el entorno de *Matlab & Simulink*. La herramienta fue desarrollada principalmente por el profesor Robert Babuška como soporte software de las teorías y técnicas de modelado e identificación fuzzy descritas en el libro *Fuzzy Modeling for Control* [2]. El mecanismo de identificación de la

herramienta se basa en técnicas de clusterización (mediante el algoritmo de *Gustafson-Kessel*).

3.1 IDENTIFICACIÓN

Uno de los aspectos a destacar del presente trabajo consiste en haber tomado como referencia datos procedentes de campañas de una depuradora industrial real, concretamente de la depuradora municipal de Manresa (provincia de Barcelona). Los registros originales fueron tomados con ocasión del trabajo sobre control predictivo llevado a cabo en su día por Moreno, R. [8]. A partir de esos datos (o de variaciones de ellos), se han realizado numerosas pruebas de identificación. Alguno de los experimentos ya fue presentado con anterioridad [11] y otros, llevados a cabo posteriormente, serán mostrados aquí, ampliando así el estudio con nuevos casos relevantes. Para este artículo se han seleccionado tres casos concretos, correspondientes a tres identificaciones diferentes. Mostraremos de forma gráfica datos de entrada y salida (con el número de muestras en el eje de abscisas) y algunas gráficas de validación. En estas gráficas se incluye el índice de validación denominado VAF^1 , que es uno de los que se usa habitualmente para dar validez a los modelos identificados, comparando la salida *real* con la salida *estimada* del modelo. En nuestro estudio, la salida *real* es una salida obtenida en simulación y la salida *estimada* se obtiene aplicando las mismas entradas al modelo fuzzy identificado.

3.1.1 Caso 1

En las Figuras 2 y 3 vemos la representación gráfica de los datos de entrada y salida y en la Figura 4 se muestran los resultados de validación de este caso:

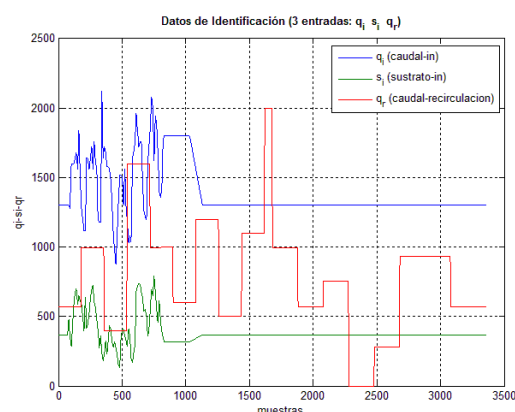


Figura 2: Datos de identificación del caso 1 (q_i , s_i , q_r)

¹ VAF : Percentile variance accounted for between two signals

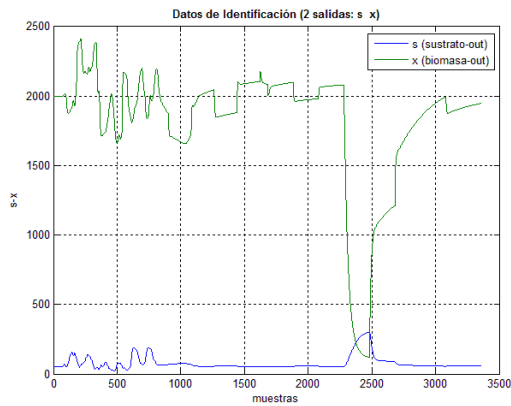
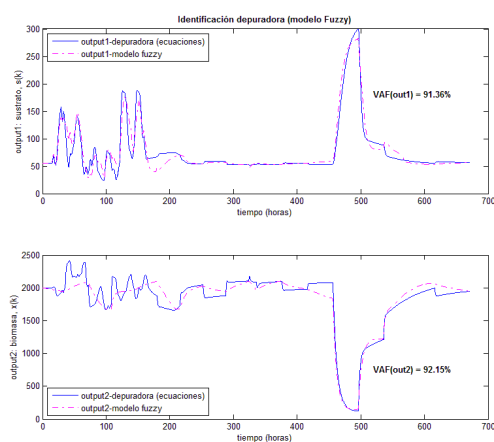
Figura 3: Datos de identificación del caso 1 (s , x)

Figura 4: Validación del modelo fuzzy (caso 1)

3.1.2 Caso 2

Se utilizaron para la validación datos diferentes a los de identificación. Vemos la gráfica de validación en la figura siguiente (Fig. 5):

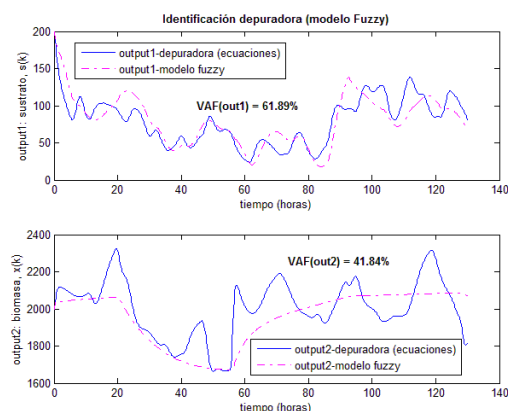


Figura 5: Validación del modelo fuzzy (caso 2)

3.1.3 Caso 3

En el tercer caso considerado, los datos de validación también fueron diferentes a los datos de identificación. Pero la principal característica de este caso es que, en los parámetros de configuración referentes a las hipótesis de la dinámica del proceso, se ha añadido un parámetro que en los otros dos casos se consideró nulo. Concretamente, en este caso no se ha despreciado en la dinámica del proceso la influencia directa de q_i . Como consecuencia de ello, el índice de validación es bastante mejor que el del caso 2. En la figura siguiente, (Fig. 6), se muestra la gráfica de validación correspondiente a este caso:

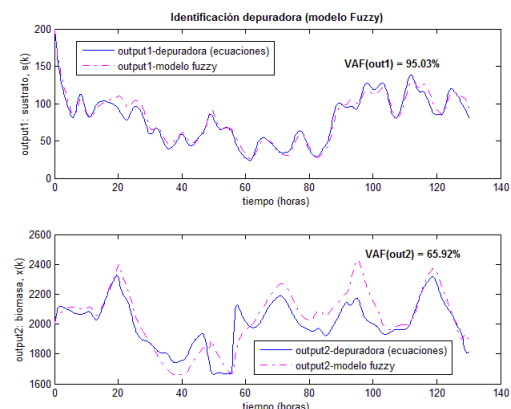


Figura 6: Validación del modelo fuzzy (caso 3)

3.2 MODELOS FUZZY IDENTIFICADOS

Los modelos fuzzy identificados son modelos del tipo *Takagi-Sugeno* [10], los cuales están compuestos por un conjunto de reglas *if-then*, cada una de las cuales representa un submodelo lineal. El antecedente o premisa de cada una de las reglas se compone de varias proposiciones simples conectadas mediante operadores lógicos “*and*”. Las proposiciones simples comparan cada componente del vector antecedente con un cierto valor o conjunto difuso. Y el consecuente o conclusión de cada regla es una combinación lineal de las variables que forman el vector consecuente más un término independiente (submodelo lineal).

Mostraremos a continuación, a modo de ejemplo, sólo las reglas de la salida-1 del modelo fuzzy identificado correspondiente al caso 1 (Tabla 2). Las demás reglas tendrán una estructura similar, pero con coeficientes diferentes y con más o menos componentes para los vectores antecedente y consecuente, como es lógico:

Tabla 2: Modelo *Takagi-Sugeno* para $y_1 = s(k)$

1. if $y_1(k-1)$ is A_{11} and $y_2(k-1)$ is A_{12} and $u_2(k-1)$ is A_{13} and $u_3(k-1)$ is A_{14} and $u_3(k-2)$ is A_{15} then $y_1(k) = (7.10) \cdot 10^{-1} \cdot y_1(k-1) - (1.13) \cdot 10^{-3} \cdot y_2(k-1) + (5.50) \cdot 10^{-2} \cdot u_2(k-1) + (1.27) \cdot 10^{-2} \cdot u_3(k-1) - (1.39) \cdot 10^{-2} \cdot u_3(k-2) - (1.29) \cdot 10^0$
2. if $y_1(k-1)$ is A_{21} and $y_2(k-1)$ is A_{22} and $u_2(k-1)$ is A_{23} and $u_3(k-1)$ is A_{24} and $u_3(k-2)$ is A_{25} then $y_1(k) = (5.91) \cdot 10^{-1} \cdot y_1(k-1) - (9.77) \cdot 10^{-3} \cdot y_2(k-1) + (2.48) \cdot 10^{-2} \cdot u_2(k-1) + (4.93) \cdot 10^{-2} \cdot u_3(k-1) - (3.41) \cdot 10^{-2} \cdot u_3(k-2) + (5.84) \cdot 10^0$
3. if $y_1(k-1)$ is A_{31} and $y_2(k-1)$ is A_{32} and $u_2(k-1)$ is A_{33} and $u_3(k-1)$ is A_{34} and $u_3(k-2)$ is A_{35} then $y_1(k) = (9.33) \cdot 10^{-1} \cdot y_1(k-1) - (6.05) \cdot 10^{-3} \cdot y_2(k-1) + (2.47) \cdot 10^{-2} \cdot u_2(k-1) - (1.07) \cdot 10^{-2} \cdot u_3(k-1) + (1.01) \cdot 10^{-2} \cdot u_3(k-2) + (7.27) \cdot 10^0$
4. if $y_1(k-1)$ is A_{41} and $y_2(k-1)$ is A_{42} and $u_2(k-1)$ is A_{43} and $u_3(k-1)$ is A_{44} and $u_3(k-2)$ is A_{45} then $y_1(k) = (8.98) \cdot 10^{-1} \cdot y_1(k-1) - (3.73) \cdot 10^{-2} \cdot y_2(k-1) + (3.11) \cdot 10^{-2} \cdot u_2(k-1) - (5.23) \cdot 10^{-2} \cdot u_3(k-1) + (5.64) \cdot 10^{-2} \cdot u_3(k-2) + (6.39) \cdot 10^1$
5. if $y_1(k-1)$ is A_{51} and $y_2(k-1)$ is A_{52} and $u_2(k-1)$ is A_{53} and $u_3(k-1)$ is A_{54} and $u_3(k-2)$ is A_{55} then $y_1(k) = (1.50) \cdot 10^0 \cdot y_1(k-1) + (5.37) \cdot 10^{-3} \cdot y_2(k-1) - (3.48) \cdot 10^{-2} \cdot u_2(k-1) - (1.90) \cdot 10^{-2} \cdot u_3(k-1) + (8.47) \cdot 10^{-3} \cdot u_3(k-2) - (1.39) \cdot 10^{-1}$
6. if $y_1(k-1)$ is A_{61} and $y_2(k-1)$ is A_{62} and $u_2(k-1)$ is A_{63} and $u_3(k-1)$ is A_{64} and $u_3(k-2)$ is A_{65} then $y_1(k) = (9.65) \cdot 10^{-1} \cdot y_1(k-1) - (5.22) \cdot 10^{-3} \cdot y_2(k-1) + (2.98) \cdot 10^{-2} \cdot u_2(k-1) + (1.93) \cdot 10^{-2} \cdot u_3(k-1) - (2.89) \cdot 10^{-2} \cdot u_3(k-2) - (3.43) \cdot 10^{-1}$

Cada una de las reglas representa un submodelo lineal y las componentes del vector consecuente indican las dependencias del submodelo. En nuestro caso de estudio, el vector antecedente coincide con el vector consecuente y consideraremos un vector $\mathbf{x}_a = \mathbf{x}$, común a ambas salidas, constituido por: $[y_1(k-1), y_2(k-1), u_1(k-1), u_2(k-1), u_2(k-1), u_2(k-2)]$. La expresión numérica global para cada una de las dos salidas del modelo fuzzy se obtendrá combinando todas las reglas y aplicando un método de cómputo numérico, como el método del centroide, que tiene en cuenta los consecuentes de todas las reglas, con la ponderación adecuada. Se concreta matemáticamente esta idea en la expresión (1):

$$\tilde{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^{m_i} \mu_{A_{j1}}(x_{a1}) \mu_{A_{j2}}(x_{a2}) \dots \mu_{A_{jv_i}}(x_{av_i}) \phi_{ij}(\mathbf{x})}{\sum_{j=1}^{m_i} \mu_{A_{j1}}(x_{a1}) \mu_{A_{j2}}(x_{a2}) \dots \mu_{A_{jv_i}}(x_{av_i})} \quad (1)$$

$i = 1, 2$
 $j = 1, 2, \dots, m_i$
 m_i : número de reglas de la salida y_i

y con las siguientes funciones de pertenencia:

$$\beta_{ij}(\mathbf{x}_a) = \frac{\mu_{A_{j1}}(x_{a1}) \mu_{A_{j2}}(x_{a2}) \dots \mu_{A_{jv_i}}(x_{av_i})}{\sum_{j=1}^{m_i} \mu_{A_{j1}}(x_{a1}) \mu_{A_{j2}}(x_{a2}) \dots \mu_{A_{jv_i}}(x_{av_i})} \quad (2)$$

$i = 1, 2$
 $j = 1, 2, \dots, m_i$
 m_i : número de reglas de la salida y_i

la expresión numérica de la salida quedará así:

$$\tilde{y}_i = \sum_{j=1}^{m_i} \beta_{ij}(\mathbf{x}_a) \phi_{ij}(\mathbf{x}) \quad (3)$$

$i = 1, 2$
 $j = 1, 2, \dots, m_i$
 m_i : número de reglas de la salida y_i

3.3 FORMALIZACIÓN EN EL ESPACIO DE ESTADOS

La reformulación de las reglas fuzzy en forma de ecuaciones de estado supondrá la ventaja de poder manipularlas de manera analítica, pudiendo realizar el cálculo de predicciones del algoritmo de control predictivo y expresar la ley de control en forma explícita, que es una de las principales aportaciones de nuestro trabajo, siguiendo la línea iniciada previamente por otros autores [3]. Resumiremos a continuación lo más relevante del correspondiente desarrollo, ya presentado y descrito en [11].

3.3.1 Modelo fuzzy en el espacio de estados

Realizando las adecuadas definiciones matemáticas previas, podemos agrupar conjuntamente las reglas de nuestros modelos fuzzy tipo *Takagi-Sugeno* en las siguientes Ecuaciones de Estado (matriciales):

$$\mathbf{z}_m(k+1) = \bar{\mathbf{A}}_m \mathbf{z}_m(k) + \bar{\mathbf{B}}_m \mathbf{u}_a(k) + \bar{\mathbf{R}}_m \quad (4)$$

$$\mathbf{y}_m(k) = \bar{\mathbf{C}}_m \mathbf{z}_m(k) \quad (5)$$

siendo las *Matrices de Estado* y los coeficientes matriciales:

$$\bar{\mathbf{A}}_m = \sum_{j=1}^{mr} (\beta_j(\mathbf{x}_a) \mathbf{A}_{mj}); \quad \bar{\mathbf{B}}_m = \sum_{j=1}^{mr} (\beta_j(\mathbf{x}_a) \mathbf{B}_{mj}); \quad (6)$$

$$\bar{\mathbf{C}}_m = \sum_{j=1}^{mr} (\beta_{j12}(\mathbf{x}_a) \mathbf{C}_{mj}); \quad \bar{\mathbf{R}}_m = \sum_{j=1}^{mr} (\beta_j(\mathbf{x}_a) \mathbf{R}_{mj}) \quad (7)$$

$$\mathbf{A}_{mj} = \begin{pmatrix} a_{j1} & a_{j2} & 0 & b_{j2} \\ 0 & a_{j2}^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{mr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{mr} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B}_{mj} = \begin{pmatrix} b_{j3} & b_{j4} \\ b_{j3}^* & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{C}_{mj} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{R}_{mj} = \begin{pmatrix} r_j \\ r_j^* \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

3.3.2 Dependencia temporal de los coeficientes de las ecuaciones de estado

Una particularidad importante de las ecuaciones de estado obtenidas es que los coeficientes matriciales $\bar{\mathbf{A}}_m$, $\bar{\mathbf{B}}_m$, $\bar{\mathbf{C}}_m$ y $\bar{\mathbf{R}}_m$ dependen del vector antecedente

x_a (a través de $\beta_i(x_a)$) y, por tanto, también dependen del instante de tiempo k -ésimo, porque x_a depende del tiempo. Será necesario, por tanto, recalcular tales coeficientes en cada iteración o período de simulación, tras haber actualizado el vector antecedente x_a y también $\beta_i(x_a)$. El comportamiento de nuestro sistema multivariable no lineal identificado mediante un modelo fuzzy ha quedado finalmente representado por un sistema de ecuaciones de estado con coeficientes dependientes del tiempo. En [3] se citan dos referencias teóricas sobre la asociación de sistemas que tengan dinámicas no lineales con sistemas lineales variantes en el tiempo (Leith, D.J., Leithead, W.E., 1998 y 1999).

4 EXPERIMENTOS DE CONTROL PREDICTIVO (FMBPC)

La estrategia de control predictivo empleada consiste en deducir una ley de control analítica y explícita, haciendo uso de las ecuaciones de estado detalladas en (4) y (5) e imponiendo para cada una de las dos salidas la restricción del seguimiento de sendas trayectorias de referencia para un cierto horizonte de predicción. No es posible incluir aquí el desarrollo matemático realizado, por lo que nos centraremos en presentar los resultados de los experimentos en los que se ha usado la ley de control deducida.

4.1 SIMULACIÓN

Los experimentos de control predictivo en simulación han sido desarrollados en el entorno *Matlab & Simulink*. El soporte principal ha sido un diagrama de bloques de *Simulink*, siendo los bloques más significativos el del controlador predictivo y el de la depuradora. El funcionamiento del bloque controlador se ha basado en una *s-function* de *Simulink*, en la que se ha escrito en *Matlab* el código necesario para realizar los cálculos del algoritmo de control predictivo basado en la ley de control analítica obtenida (entre ellos, la actualización en cada iteración de los coeficientes de las ecuaciones).

4.2 RESULTADOS

Se hicieron numerosas pruebas, con distintas perturbaciones de entrada y diferentes referencias de las salidas, para el horizonte de predicción (H) y para otros parámetros. Resumiremos los resultados obtenidos presentando las gráficas de la evolución temporal de las variables controladas, es decir, de la concentración de sustrato en el efluente, s (mg/l) y de la concentración de biomasa en el reactor, x (mg/l), así como la gráfica de la evolución temporal de la variable de control, es decir, la del caudal de recirculación, q_r (m³/h), que estará determinado por el

algoritmo de control predictivo. Se incluyen también, en las gráficas de s y x , las evoluciones de las perturbaciones (caudal de entrada, q_i (m³/h) y concentración de sustrato en la entrada, s_i (mg/l)). En las pruebas llevadas a cabo se consideraron diferentes valores de referencia para las dos salidas, estando principalmente tales valores en el intervalo de 45 mg/l a 60 mg/l para s_{ref} y en el de 700 mg/l a 2000 mg/l para x_{ref} . El intervalo de tiempo de simulación elegido fue de 0 a 166 horas. En ninguno de los casos seleccionados fue necesario imponer cotas al incremento de la acción de control. Sin embargo, hay casos en los que sí sería preciso hacerlo para evitar inestabilidades, pero el análisis de tal problema requiere un estudio más amplio. También sería necesario un estudio complementario para el horizonte de predicción (parámetro muy importante en control predictivo). Se indican los horizontes de predicción usados para los resultados mostrados.

4.2.1 Modelo identificado en 3.1.1, con $H=6$

Evoluciones de las salidas (más perturbaciones):

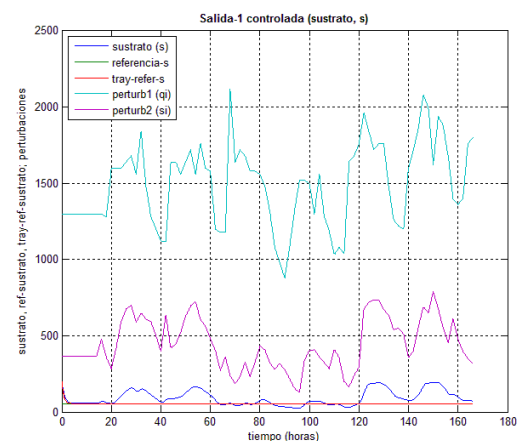


Figura 7. Sustrato y perturbaciones (identif. 3.1.1)

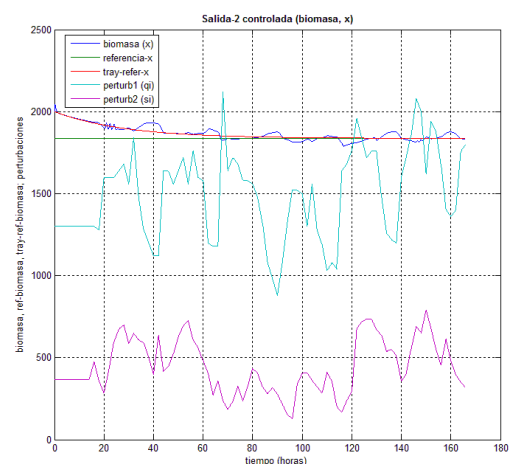


Figura 8. Biomasa y perturbaciones (identif. 3.1.1)

Acción de control predictivo fuzzy:

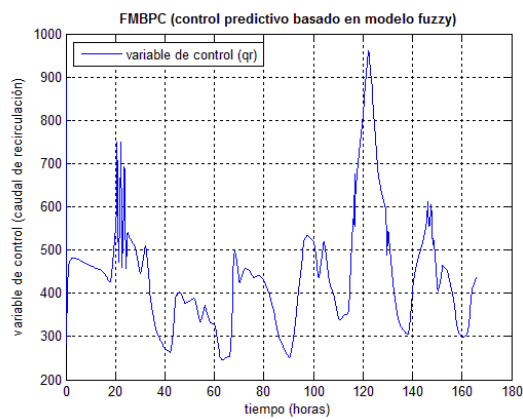


Figura 9. Control predictivo, q_r (identif. 3.1.1)

4.2.2 Modelo identificado en 3.1.2, con $H=3$

Evoluciones de las salidas (más perturbaciones):

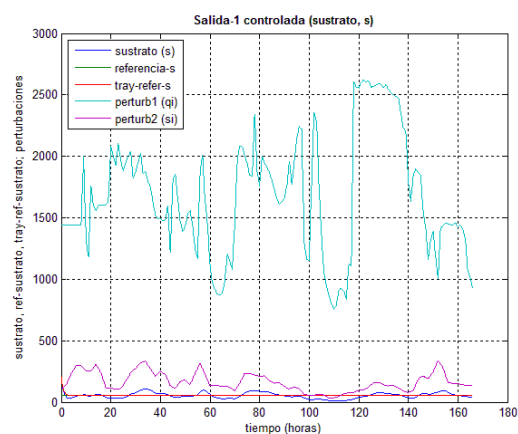


Figura 10. Sustrato y perturbaciones (identif. 3.1.2)

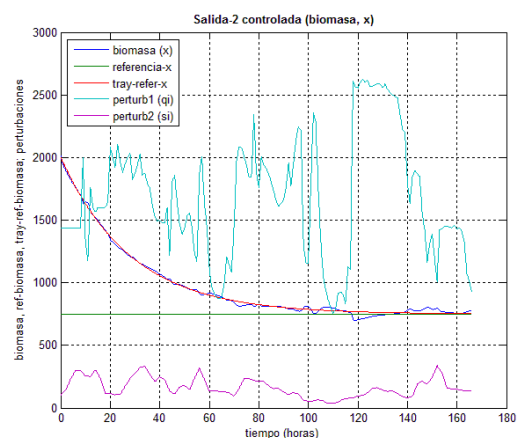


Figura 11. Biomasa y perturbaciones (identif. 3.1.2)

Acción de control predictivo fuzzy:

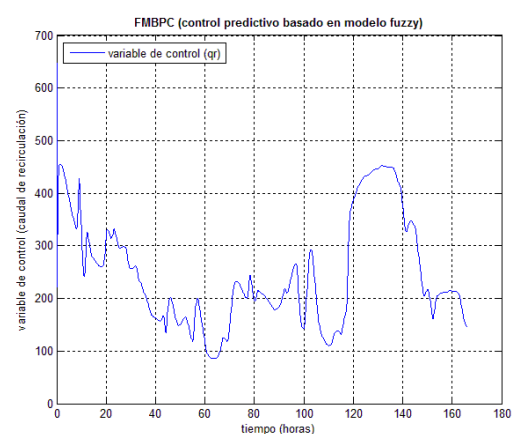


Figura 12. Control predictivo, q_r (identif. 3.1.2)

4.2.3 Modelo identificado en 3.1.3, con $H=250$

Evoluciones de las salidas (más perturbaciones):

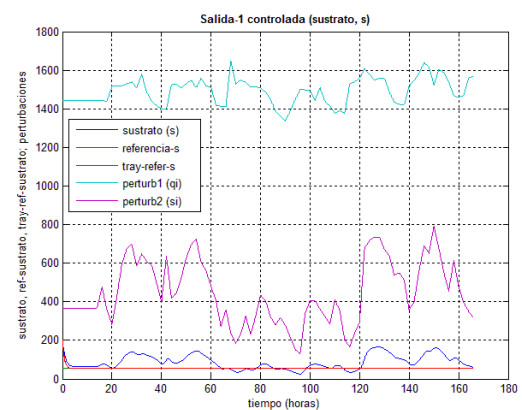


Figura 13. Sustrato y perturbaciones (identif. 3.1.3)

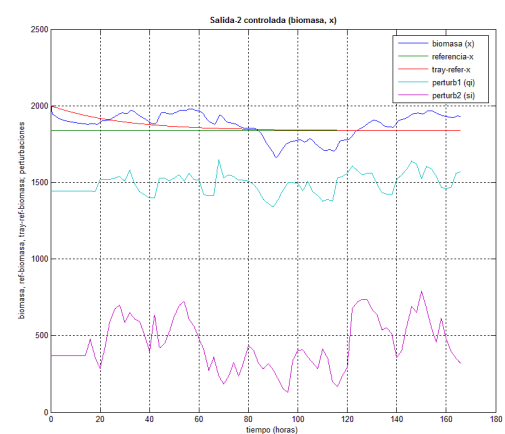


Figura 14. Biomasa y perturbaciones (identif. 3.1.3)

Acción de control predictivo fuzzy:

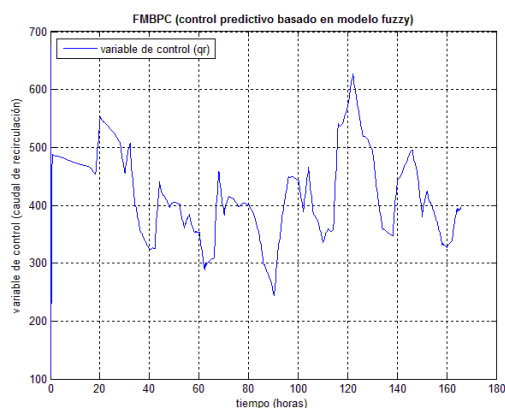


Figura 15. Control predictivo, q_r (identif. 3.1.3)

5 CONCLUSIONES

En los experimentos realizados se ha aplicado una particular metodología de control predictivo fuzzy a un proceso con dinámica compleja, expresando la ley de control en forma analítica y explícita. En todos los casos presentados, la respuesta del sistema controlado (variables s y x) parece razonablemente satisfactoria, teniendo en cuenta la gran dificultad que supone controlar un sistema multivariable, altamente no lineal y de carácter biológico. Además, se ha extendido a un caso multivariable y con perturbaciones, un método de obtención de la ley de control predictivo en forma analítica y explícita, probado previamente para un sistema no multivariable, sin perturbaciones y no tan complejo.

En el proceso de estudio e investigación que precede a la presentación de este artículo se han seguido y se siguen varias líneas de estudio, tanto relativas a la *realizabilidad* y utilidad, para sistemas complejos, de los métodos y algoritmos aquí propuestos, como a la influencia de diversos factores, como las características dinámicas del modelo identificado, el horizonte de predicción o la interrelación entre las referencias de las salidas (sistema multivariable con salidas acopladas), entre otros. Así mismo, se evalúan actualmente posibles estudios complementarios o mejoras del algoritmo propuesto, incorporando restricciones en el cálculo de la ley de control, a satisfacer mediante optimización, con el objetivo de evitar inestabilidades.

Agradecimientos

Los autores agradecen al MINECO del Estado Español la financiación del proyecto DPI2015-67341-C02-01, en el marco del cual se lleva a cabo esta investigación.

Referencias

- [1] Babuška, R. (1998-2001). Fuzzy Modeling and Identification Toolbox (FMID)-User's Guide.
- [2] Babuška, R. (1998). Fuzzy Modeling for Control. Kluwer Academic Publishers, Boston, USA.
- [3] Blažic, S., and Škrjanc, I. (2007). Design and Stability Analysis of Fuzzy Model-based Predictive Control—A Case Study. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 49, 279–292.
- [4] Camacho, E.F., y Bordons, C. (1998). Model Predictive Control. Springer, Great Britain.
- [5] Francisco, M., y Vega, P. (2006). Diseño Integrado de procesos de depuración de aguas utilizando control predictivo basado en modelos. *RIAI-Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, ISSN: 1697-7912, 3(4), 88-98.
- [6] Henze, M., Grady, C. P. L. Jr, Gujer, W, Marais, G v R & Matsuo, T., 1987. Activated Sludge Model No. 1. IAWPRC Scientific and Technical Reports No. 1. London, UK.
- [7] Mollow, S., 2002. Fuzzy Control of Multi-Input Multi-Output Processes. PhD dissertation. Delft University of Technology (Netherlands).
- [8] Moreno, R. (1994). Estimación de Estados y Control Predictivo de Proceso de Fangos Activados. Tesis Doctoral. Facultat de Ciències de la Universitat Autònoma de Barcelona (Spain).
- [9] Roubos, J.A., Mollov, S., Babuška, R., Verbruggen, H.B., (1999). *Fuzzy model-based predictive control using Takagi-Sugeno models*. *International Journal of Approximate Reasoning*, 22(1-2), 3-30.
- [10] Takagi, T., Sugeno, M., (1985). *Fuzzy Identification of Systems and its Application to Modeling and Control*. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 15 (1), 116–132.
- [11] Vallejo, P. y Vega, P. (2017). Proceedings del XV Simposio CEA de Ingeniería de Control. Universidad de Salamanca, 9-10 de febrero de 2017, Salamanca (Spain).
- [12] Zadeh, and Lotfi A., (1990). Fuzzy Sets and Systems. *International Journal of General Systems*, 17 (2), 129-138.

REFLEXIONES SOBRE EL VALOR DOCENTE DE UNA COMPETICION DE DRONES EN LA EDUCACIÓN PARA EL CONTROL

Ignacio Díaz Blanco, Álvaro Escanciano Urigüen, Antonio Robles Álvarez, Hilario López García

Área de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Oviedo

Campus universitario de Gijón s/n, 33204

{idiaz,arobles,hilario}@uniovi.es, escanciano.alvaro@gmail.com

Resumen

En este artículo se plantea una reflexión sobre el potencial valor docente en el ámbito de la ingeniería y particularmente en la ingeniería de control de las competiciones de drones y se describen las características de una competición de drones presentada en las XXXVIII Jornadas de Automática (2017). La participación en una carrera de drones como la presentada en esta edición, requiere por parte de los participantes un despliegue de competencias de carácter multidisciplinar, que involucran conocimientos de control, electrónica, mecánica y aerodinámica, entre otros, tanto para el montaje del dron, como para optimizar su comportamiento de cara a la prueba. Un planteamiento adecuado y la integración eficiente de estos elementos puede aportar una considerable ventaja en la prueba. A lo largo del texto se hace una reflexión sobre todos estos aspectos, mostrando las ventajas en el ámbito de la educación en el control que puede aportar este tipo de pruebas.

Palabras clave: Educación, ingeniería de control, drones

1. INTRODUCCIÓN

Hace apenas medio siglo, el mundo del aeromodelismo estaba reservado para unos pocos privilegiados que, combinando fuertes conocimientos teóricos con una gran capacidad práctica a la hora de construir prototipos, conseguían a duras penas unos minutos de vuelo. Con el paso del tiempo y la llegada de la era digital, la electrónica cada vez se fue reduciendo, no solo en tamaño sino también en coste y esto permitió introducir una gran cantidad de componentes electrónicos en un espacio muy reducido, con poco peso y al alcance de todos los bolsillos. En el mundo del aeromodelismo, la irrupción de esta electrónica (pequeña y barata), supuso la posibilidad de sustituir la estabilización mecánica que proporciona el efecto giroscópico de la máquina de vuelo rotativo más famosa (el helicóptero) por una estabilización electrónica, mucho más compleja y basada en el control independiente de cada uno de los 4, 6, 8 ó 12 motores de un

multirrotor, que se denomina comúnmente *dron*.

La posibilidad de construir a bajo coste un dispositivo extremadamente versátil como el dron, y en todas sus etapas, conlleva una innumerable cantidad de decisiones de diseño que implican la puesta en práctica de conocimientos de un amplio espectro de disciplinas con especial protagonismo de la ingeniería de control, la integración de múltiples sistemas en una unidad eficiente y la aplicación de una metodología que implica diseño, montaje y pruebas de verificación. Todos estos ingredientes, que están en el ADN de la ingeniería de sistemas y automática, conforman un escenario óptimo en la formación de ingenieros de nuestra rama de conocimiento.

En el marco de las presentes XXXVIII Jornadas de Automática, se planteó llevar a cabo un concurso de drones, en aras de contribuir al objetivo de conseguir un mayor conocimiento e implicación de alumnos de último curso de grado y máster en temas de ingeniería de control, aunque también en otros aspectos de ingeniería, como la electrónica, el diseño aerodinámico, etc. La competición se realiza con cuadricópteros y hexacópteros con características de partida similares, incluyendo pruebas de habilidad, velocidad y máxima distancia en vuelo recorrida con una sola carga de batería.

De forma análoga a las competiciones de Fórmula 1, una competición de drones en diversas modalidades, como la que aquí se plantea, conlleva una importante componente tecnológica de carácter multidisciplinar, que implica la optimización de los drones desde cualquier aspecto que el participante considere ventajoso: aerodinámica, ajuste de los sistemas de control de vuelo (PID), equilibrio mecánico, etc. donde una adecuada optimización del dron, aportaría ventajas en varios niveles: menor consumo, mayores prestaciones dinámicas, estabilidad y maniobrabilidad, entre otras.

2. ANTECEDENTES

2.1. La ludificación en la educación

La idea sobre la que se reflexiona en este trabajo, en la que se plantea el análisis de una competi-

ción de drones en cuanto a su valor docente en el ámbito de la ingeniería de control y de sistemas, tiene conexiones con el concepto de *ludificación* (del inglés, *gamification*). El término *ludificación* describe el uso de elementos de juego en contextos de no-juego, con el objetivo de involucrar a la gente en una variedad de tareas [5]. Uno de los elementos clave en la ludificación es la competición. La competición implica alcanzar un objetivo en un contexto de contienda entre varios rivales (individuos o equipos) donde generalmente se da un perdedor y un ganador. Aunque los beneficios en el ámbito de la educación del elemento de competición han sido objeto de cierta controversia [2] (por ejemplo, focalización en el objetivo y no en el proceso, o el estrés y desmotivación en caso de malos resultados) muchos estudios se inclinan por los beneficios, vinculándola con las ideas de motivación, reconocimiento, desafío y el fomento del aprendizaje activo.

La idea que se analiza aquí, como se verá más adelante, implica una competición en 4 modalidades (carrera, eficiencia, velocidad y diseño), por lo que las expectativas de fracaso son menores, al haber más opciones para el éxito. Por otra parte, la participación es por equipos, por lo que el impacto de una derrota es potencialmente menor al ser compartido.

2.2. Experiencias anteriores: carreras de drones

Un claro antecedente de la idea que se analiza en este artículo son las carreras de drones. En este sentido, la participación en el campeonato de España, celebrado en octubre de 2016 en Barcelona, sirve como referencia. En esta prueba pudo comprobarse ya el impacto de la ingeniería en la consecución de una ventaja competitiva en la consecución del éxito. La conclusión de los organizadores fue que no existe una configuración perfecta para un dron, sino más bien una configuración óptima para una prueba concreta en unas condiciones determinadas y en un momento de la competición conocido. Cada nueva parte del “hardware” del dron que se sustituye, impacta en la configuración de la aeronave y el control debe ser nuevamente reconfigurado.

Esta experiencia y otras carreras celebradas a nivel local ponen de manifiesto que el diseño, ajuste y parametrización del dron, aspectos estrechamente ligados a los paradigmas de la ingeniería de sistemas y de la ingeniería de control, tienen un impacto significativo en los resultados obtenidos en la prueba que, cuando menos, rivaliza con el factor de habilidad en el pilotaje.

3. VALOR EDUCATIVO EN INGENIERÍA DE CONTROL

3.1. METODOLOGÍA

3.1.1. Flujo de trabajo

El diseño y construcción de un dron, especialmente si se destina a una competición, requiere al estudiante poner en práctica una *metodología* de optimización y diseño, basada en elaboración de hipótesis, prueba y error. Dependiendo del grado de dedicación, podrá atacar el diseño a varios niveles: diseño preliminar de controladores; simulación, empleando herramientas como simulink u otros más específicos como gacebo; pruebas reales con prototipo; y despliegue final (carrera).

Aunque existen textos excelentes sobre metodología de diseño de sistemas de control (ver, [3], cap. 10), la mera puesta en práctica de este flujo de trabajo le hará llegar, por sus propios medios, a muchas de las recomendaciones de diseño descritas en la literatura y le resultarán obvias al final del proceso. En definitiva, le transmiten, por inmersión, varios conceptos difícilmente transmisibles por medio de un estudio meramente teórico a través de los textos. Así, por ejemplo, podrá comprobar la existencia de múltiples grados de libertad en el diseño, la necesidad de encontrar un balance óptimo entre los mismos y la importancia del ciclo planificación-test. Todo ello tiene un enorme valor educativo de carácter *transversal* en la ingeniería de sistemas y control, que constituye una excelente formación complementaria a la impartida en los estudios reglados.

3.1.2. Codiseño de proceso y control

Otro aspecto de importancia en control, fuertemente ligado a la metodología, es el diseño integrado (codiseño) del proceso y el control [1, 4]. En el diseño de sistemas de control, a menudo las modificaciones en la planta son una alternativa ventajosa frente las modificaciones en el propio sistema de control. Esta cuestión se ha planteado en sistemas aerodinámicos, en los que puede mejorarse la maniobrabilidad haciendo el diseño aerodinámico deliberadamente inestable [6] y delegando en el control para recuperar la estabilidad del conjunto [1]. Este enfoque está en la base del desempeño y maniobrabilidad que muestran los aviones de combate modernos.

En el diseño de drones a pequeña escala enfocados a carreras, o a competiciones específicas como la que se presenta en estas Jornadas, esta posibilidad se ve catalizada por la implantación y accesibilidad hoy en día de tecnologías de impresión 3D y las herramientas de simulación de elemen-

tos finitos, que brindan infinitas posibilidades de optimización en el diseño:

- Reducción del peso en el chasis, eliminando secciones del mismo que contribuyen poco a la resistencia mecánica del dron a partir de los resultados del cálculo de esfuerzos bajo simulación.
- Modificaciones en el chasis y otros elementos optimizando comportamiento aerodinámico, que faciliten el control dinámico de estabilidad del dron.
- Selección óptima de la posición y orientación de los elementos de propulsión (actuadores). En este sentido, por ejemplo, ya se han descrito configuraciones orientadas a carreras y competiciones, situando las hélices en dos niveles y con orientaciones específicas [7].

3.1.3. Grados de libertad en el diseño

Otra idea que se percibe en el diseño de un dron es que el control aporta *grados de libertad* en la ingeniería. El control permite modular el comportamiento de un sistema tecnológico dado. Además de aportar *estabilidad* (como en el caso de un segway), permite diseñar a medida la *maniobrabilidad* de un sistema. Aún sin conocimientos de teoría de control, los pilotos de drones son conscientes de que los conceptos de estabilidad y maniobrabilidad están, por propia naturaleza, reñidos. Si lo que se busca es un vuelo de precisión, tranquilo, estable, la ejecución de una ruta programada vía GPS o la filmación de un video de gran calidad, el modo de vuelo adecuado a configurar sería el “modo estable”, modo en el que toda la sensorización se pone al servicio del control y se dota al aparato de una gran estabilidad (sacrificando tiempos de respuesta y maniobrabilidad). Por el contrario, cuando lo que se desea es configurar una aeronave competitiva capaz de dejar a todas las demás atrás en una carrera mediante la ejecución de giros cerrados, loopings, tirabuzones y descensos en pica-do el modo correcto de vuelo a configurar, sería el denominado “modo acrobático”, en el que se desactiva toda la sensorización del dron y el control únicamente actúa como interfaz entre el piloto y la aeronave pero en ningún caso estabiliza la misma, es el piloto el que debe hacerlo. En este modo de vuelo, se prioriza, por tanto, la maniobrabilidad por encima de la estabilidad.

3.2. SISTEMAS DE CONTROL

Además de la metodología, que implica beneficios educativos de carácter transversal –aunque fuertemente ligados al control–, el diseño de un dron

tiene una componente de alto valor específico en ingeniería de control que es el propio diseño y ajuste de los sistemas de control.

Los sistemas de control están en el centro del diseño del dron y permiten mantener estable el dron a partir de la información aportada por los sensores (giróscopos o acelerómetros). Los frameworks típicos para programación del dron, constan habitualmente de un *firmware*, que se carga en la controladora del dron y que contiene la planificación de tareas y los lazos de estabilización y control del dron, y un *software* que permite la carga o transferencia del firmware, así como la modificación de parámetros y reglajes del mismo desde un ordenador. El software permite el ajuste de una amplísima variedad de parámetros, incluyendo acciones P, I, D para varios lazos independientes, como el ángulo o velocidad angular en los ejes *roll*, *pitch* y *yaw* (alabeo, cabeceo y guiñada), pero también multitud de ajustes adicionales, como la sensibilidad de los mandos o sistemas como el TPA (*throttle PID attenuation*), que reduce la intensidad de las acciones de control para valores elevados en la referencia, para evitar oscilaciones. La variedad de ajustes es extensísima y diferente en función del software/firmware empleado.

A la hora de diseñar el control de un dron, el usuario puede optar por el caso de menor complejidad, cargando en la controladora del dron los modos de vuelo por defecto, pudiendo reajustar a partir de ellos de forma independiente las acciones de control y resto de parámetros para los distintos lazos.

No obstante, en el caso de que los modos de vuelo preconfigurados no sean suficientes, existen infinidad de opciones de modificación del diseño. Los paquetes software de controladores de vuelo más extendidos son de código abierto, destacando algunos como *cleanflight* [8], o *librepilot* [9], ambos soportando gran variedad de controladoras y configuraciones de drones.

Al tratarse de herramientas de código abierto (por ejemplo, *cleanflight* está en *github* y *librepilot* puede encontrarse en *bitbucket*), es posible entrar a nivel de código para editar el existente o incluso crear nuevos programas y bucles de control que serán compilados y cargados a la controladora a través del software proporcionado por el fabricante. Esta última opción permitiría abordar virtualmente cualquier paradigma de control del estado del arte (control multivariable, esquemas adaptativos, control predictivo, etc.). Así, podrían, por ejemplo, plantearse esquemas híbridos, con distintos “modos de control” entre los que el dron podría conmutar en pleno vuelo, bien comandadas por el piloto, o bien de forma automática, en función de las condiciones de vuelo o de la prueba.

3.3. ASPECTOS TECNOLÓGICOS

El diseño del dron, finalmente, tiene una importantísima faceta tecnológica. El control está intrínsecamente ligado a los bloques físicos: sensores, actuadores y planta. La intensa componente tecnológica y de ingeniería que implica el diseño y el montaje un dron comporta dificultades y situaciones específicas que difícilmente pueden describirse en textos teóricos. En esta sección describimos, a modo de ejemplo, algunos de ellos:

3.3.1. Montaje del dron

Supone un procedimiento común en ingeniería: consultar información técnica, implementar un sistema y probarlo. En el montaje del dron cabe incluir también el diseño del *frame* (chasis) mediante impresión 3D, mecanizado del carbono, etc.

3.3.2. Características y dimensiones del dron

La elección y dimensionado del frame tiene también varias implicaciones que requieren una elección óptima. El tamaño incrementa el peso, pero admite hélices mayores. Por otra parte el material del que esté hecho el frame, influirá también en el peso y además en la resistencia mecánica, que confiere ventajas en carrera en caso de impacto. Estudio del efecto de la geometría, distancia entre ejes, etc.

3.3.3. Hélices

Selección de las hélices (bipala, tripala). La elección del tipo y dimensiones de las hélices determina el empuje tanto absoluto como específico en función de las revoluciones. El tamaño de las hélices, asimismo, condiciona el tamaño del frame y por tanto el peso, por lo que implica alcanzar un balance óptimo. Finalmente, el número de palas tiene una influencia en características como la velocidad punta, aceleración y maniobrabilidad (siendo las bipala mejores en las dos primeras y las tripala superiores en la tercera).

3.3.4. Circuitos estabilizadores de corriente

Efectos en el rendimiento del dron. Posible impacto en el consumo de batería.

4. CARACTERÍSTICAS DE LA PRUEBA

En la sección anterior se han hecho reflexiones y expuesto algunas de las múltiples facetas de valor docente que comporta el diseño y montaje de un

dron, por ejemplo para una competición convencional. Sin embargo, las competiciones de drones, en general, no están planteadas con un objetivo docente y, más concretamente, en el ámbito de la ingeniería de control. En este artículo se plantea una reflexión sobre la posibilidad de introducir algunas modificaciones y elementos específicos a una competición convencional con el objeto de incrementar su potencial valor educativo en el ámbito del control. Con este objeto, se describen algunas ideas generales, basadas en la experiencia de diseño de una competición de drones para las XXXVIII Jornadas de Automática con ingredientes específicos para alcanzar dicho propósito, con el objeto de que sirvan de utilidad o de guía para otras experiencias.

4.1. TIPOS DE DRON

Para asegurar la homogeneidad de la prueba, es conveniente establecer limitaciones al tipo y dimensiones de los drones y/o de sus componentes, incluyendo limitaciones de tamaño (medidas de frames), peso total, tipo de baterías, etc.

4.2. PRUEBAS

4.2.1. Carrera en un circuito

La prueba de carrera es, probablemente, la más exigente, requiriendo habilidad en el pilotaje, velocidad de respuesta dinámica, estabilidad y maniobrabilidad. La carrera de drones puede planificarse con dinámica similar a la de una competición convencional, pero con algunos ingredientes específicos (obstáculos, túneles con geometrías difíciles, viento, etc.) que permitirán evaluar la maniobrabilidad y estabilidad en vuelo de los drones, conseguidas con el “tuneado” del dron (electrónica, aerodinámica, geometría) y el ajuste de los sistemas de control del dron.

4.2.2. Máxima distancia recorrida en vuelo

Con este tipo de prueba se plantea evaluar la *eficiencia* en el consumo obtenida gracias al diseño y el ajuste de los sistemas de control, frente a la “eficacia” en carrera. La prueba puede diseñarse computando la máxima distancia que es capaz de recorrer en vuelo un dron con una sola batería cargada, en un circuito pequeño y sencillo que no suponga un reto para que, de esta forma, se prime la faceta de eficiencia.

4.2.3. Velocidad entre dos puntos

Esta modalidad persigue poner a prueba la respuesta dinámica en el dron, el control de potencia

y la precisión para aterrizar en un punto. La prueba puede basarse en la realización un “Sprint” en línea recta, con despegue desde suelo, contabilizando el tiempo empleado en llegar desde la línea de salida a la línea de meta, aterrizando en un área dada.

Esta prueba, que supone una intensa demanda de corriente en la batería, podría combinarse con la prueba de eficiencia anterior, lo que plantea mayor dificultad en la optimización del conjunto.

4.2.4. METODOLOGÍA Y DISEÑO

Este apartado tiene como objetivo evaluar la metodología aplicada y las decisiones en el diseño. Para ello, cada participante o equipo deberá elaborar un documento de diseño, en el que deberá describir todo el proceso (elección de los componentes, el diseño de los controladores, aspectos relativos a la integración de los sistemas, etc.) y argumentar el porqué de las decisiones adoptadas.

Los documentos pueden ser sometidos a un proceso de revisión por un comité, que valore de forma global la calidad de los documentos (argumentos, decisiones de diseño, presentación formal, legibilidad, etc.). Asimismo, el comité podrá recabar *in situ*, durante las fases de prueba, información acerca de los diseños y comprobar de primera mano cualquier aspecto que permita complementar las valoraciones. Finalmente, el comité los ordenará en un ranking.

4.3. SISTEMA DE PARTICIPACIÓN CRUZADA

Uno de los retos de la prueba es el de aislar la componente de *habilidad* de la componente *técnica* en el resultado de la prueba. Los resultados de la competición, o al menos una parte de ellos, deben poder reflejar el rendimiento, maniobrabilidad y respuesta dinámica del dron de forma independiente de la habilidad del piloto. Una posibilidad es un sistema de participación cruzada, en el que cada dron sea pilotado por un número n de participantes, elegidos por sorteo, incluyendo el participante que presenta el dron. De esta manera, es posible evaluar de forma independiente el rendimiento de ambos agregando los resultados obtenidos en las pruebas por piloto y por dron.

4.4. RANKING

A partir de las pruebas obtenidas, puede establecerse un *ranking global* de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- Se calculará la puntuación total de cada equipo sumando el valor ordinal de los puestos al-

canzados en cada una de las cuatro categorías (4.2.1, 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4). El primer puesto suma 1 punto, el segundo puesto suma 2 puntos y así sucesivamente.

Cuando un equipo no finalice una prueba se le asignará en dicha categoría una puntuación igual al número total n de equipos inscritos.

- Las puntuaciones totales obtenidas por cada equipo determinarán su posición en el ranking de la prueba, siendo el ganador absoluto de la prueba aquél que haya obtenido *menor* puntuación y asignándose los puestos sucesivos por orden *creciente* de puntos.
- En caso de empate a puntos entre dos o más equipos, su orden en el ranking se determinará de acuerdo con el puesto obtenido en la categoría de *metodología y diseño* (sección 4.2.4).

Este ranking, similar al que hay en otras pruebas deportivas (ej. la “combinada” en la vuelta ciclista), supone una función de coste multiobjetivo que premia a los equipos “más completos”, es decir, aquellos con resultados buenos en todas las pruebas.

4.5. PREMIOS Y DIPLOMAS

Los premios y el reconocimiento a los participantes con mejores resultados juegan un papel esencial en el proceso, ya que introduce objetivos que aportan motivación. La posibilidad de otorgar premios o distinciones en distintas categorías permite que los participantes tengan más opciones de éxito, mejorando sus expectativas y motivación. En la competición celebrada en las Jornadas se otorgan premios y diplomas en las categorías: absoluta (mejor ranking absoluto), metodología, carrera, eficiencia, velocidad.

5. Evaluación de resultados

5.1. Encuesta a los participantes

Una vía para evaluar el impacto de la prueba es la realización de encuestas a los propios participantes, basándose en la hipótesis de que el estudiante, especialmente en últimos cursos, tiene ya una cierta capacidad para percibir que ha aprendido algo y ha incrementado sus conocimientos. Aunque el grado de autopercepción de lo aprendido pueda ser una medida poco fiable en lo cuantitativo, sí es más confiable a un nivel binario (“aprendí” / “no aprendí”) o con un número bajo de niveles (“poco”, “algo”, “mucho”). Bajo esta hipótesis, la

agregación estadística de resultados puede aportar una medida cuantitativa más confiable, especialmente si el tamaño muestral es significativo.

La forma más adecuada de valorar tanto el grado de satisfacción de los alumnos con el evento como los conocimientos adquiridos durante el transcurso del mismo será la creación de encuestas con campos a determinar por los docentes organizadores de las pruebas. Estas encuestas serán complementadas también con informes del proceso iterativo que ha seguido cada equipo hasta configurar su aeronave para las distintas pruebas.

5.2. Reportes de diseño

Los reportes del proceso iterativo que ha seguido cada equipo hasta configurar cada aeronave para cada prueba también pueden aportar información sobre el valor docente de la prueba. No obstante, a diferencia de la encuesta, extraer indicios objetivos y cuantificables de los reportes es mucho más difícil. No se dispone propiamente de un elemento de referencia o comparación que permita valorar un incremento en el aprendizaje, salvo, quizás informes anteriores de los mismos alumnos realizados en competiciones o actividades similares. Los reportes, sin embargo, sí aportan información útil en otros aspectos. Por ejemplo, puede tenerse una percepción a nivel absoluto (no relativo) del nivel de los conocimientos y capacidades desplegadas para la prueba, que podrían aportar conclusiones sobre los puntos fuertes que fomenta la competición. Por otra parte, lo visto en los reportes puede jugar un importante papel de complementariedad, en combinación con las encuestas, que aporte un refuerzo y validación en las conclusiones extraídas de éstas.

Finalmente, si hay disponibilidad, la comparación de estos reportes con exámenes o trabajos previos de los alumnos puede enriquecer la comparación y valoración de lo aportado por la participación en la prueba.

6. CONCLUSIONES Y FUTURO TRABAJO

En este trabajo se ha pretendido dar una visión de las posibilidades del uso de competiciones o pruebas similares con drones desde dos aspectos: 1) el diseño, montaje, prueba y despliegue de un dron como actividad altamente educativa en aspectos multidisciplinarios de ingeniería y especialmente en ingeniería de sistemas y control; y 2) el valor educativo de la competición en sí misma, como estímulo y como herramienta de validación del rendimiento que puede verse, en un sentido amplio, como una “función de coste”, así como

algunas pautas y sugerencias para “modularla” a través de las bases de la competición, introduciendo especificidades para maximizar el peso de la componente técnica.

Finalmente, debemos indicar que las ideas expuestas en este trabajo son reflexiones elaboradas durante la preparación de la prueba y basadas en la información y experiencia adquirida en el proceso. Los resultados de la competición de drones no están disponibles en el momento de redactar este trabajo. Como futuras líneas de trabajo se plantean la elaboración de encuestas de participación y su posterior análisis y valoración.

Referencias

- [1] K. J. Aström. *Control System Design. Lecture notes for ME 155A*. Department of Mechanical and Environmental Engineering. University of California Santa Barbara., 2003.
- [2] I. Cantador and J. M. Conde. Effects of competition in education: A case study in an elearning environment. In *Proceedings of the IADIS International Conference E-learning*, 2010.
- [3] G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini. *Feedback Control of Dynamic Systems*. Pearson Prentice Hall, 5th edition edition, 2006.
- [4] K. J. Aström and R. M. Murray. *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. Princeton University Press, March 2010.
- [5] S. de Sousa Borges, V. H. Durelli, H. M. Reis, and S. Isotani. A systematic mapping on gamification applied to education. In *Proceedings of the 29th Annual ACM Symposium on Applied Computing*, pages 216–222. ACM, 2014.
- [6] G. Stein. Respect the unstable. *IEEE Control Systems Magazine*, 23(4):12–25, Aug. 2003.
- [7] William Thielicke. Aerodynamics in racing multirotors. Why future racing copters really should look different. <https://tinyurl.com/y7scmhfq> Sep. 26, 2015
- [8] <http://cleanflight.com>
- [9] <https://www.librepilot.org/site/index.html>

Uso del Haptic Paddle con aprendizaje basado en proyectos

Juan M. Gandarias, Antonio J. Muñoz-Ramírez y Jesús M. Gómez-de-Gabriel
 Dto. de Ingeniería de Sistemas y Automática
 Escuela de Ingenierías Industriales
 Universidad de Málaga
 jesus.gomez@uma.es

Resumen

En este trabajo se presenta la experiencia de la utilización docente de un dispositivo háptico desarrollado como una nueva versión del Haptic Paddle, creado en la Universidad de Stanford a mediados de los 90. Se trata de un dispositivo educativo de bajo coste y simple que puede ser ensamblado y programado por los estudiantes, y que se usó para enseñanza de dinámica de sistemas. El diseño realizado usa una electrónica completamente off the shelf, rodamientos y tornillería métrica estándar y piezas fabricadas mediante impresión 3D. En este trabajo se presenta este dispositivo junto con la experiencia de su utilización docente, mediante aprendizaje basado en proyectos, en una asignatura de máster de ingeniería mecatrónica. Se trata de la primera experiencia con un total de ocho kits de haptic paddle en la asignatura de Teleoperación y Telerrobótica, junto con aprendizaje basado en proyectos (ABP) y el uso de lenguajes de modelado. Se describen la organización y el desarrollo de las sesiones de prácticas con conclusiones sobre la adecuación de los dispositivos y métodos utilizados.

Palabras clave: Educación, Ingeniería basada en modelos, Aprendizaje basado en proyectos, Haptics, Teleoperación, Simulink.

1. INTRODUCCIÓN

Las nuevas tendencias en la enseñanza de la ingeniería vienen ligadas a conceptos como aprendizaje colaborativo (AC), aprendizaje basado en problemas/proyectos (ABP) o el aprendizaje autónomo, entre otros. La incorporación de estos conceptos en la formación universitaria forma parte de una metodología integradora que aproxima al estudiante a su futura vida profesional.

El uso de equipos de prácticas de bajo coste se ha visto impulsado en los últimos años en distintas ramas de la ingeniería como la robótica [6] y la telerrobótica [13] gracias a la aparición de nuevas tecnologías basadas en software y hardware libres como el uso de impresoras 3D o plataformas, co-

mo Arduino. En este sentido se pueden encontrar un gran número de trabajos en los que se utilizan equipos de prácticas con distintas metodologías docentes. En [7], por ejemplo, se describe el uso de robots móviles LEGO NXT con LabVIEW en asignaturas de mecatrónica.

Dentro del uso de equipos de prácticas de robótica y la aplicación de distintas metodologías docentes, se pueden encontrar trabajos en los que se aplica el uso de programación basada en lenguajes de modelado de dominio específico [6, 8, 14]. En otros trabajos se aplica la programación basada en modelos de dominio específico con el fin de aliviar la carga del docente [1, 2, 3].

Por otro lado, existen equipos de prácticas basados en dispositivos hápticos. Entre ellos destaca en el uso de las paletas hápticas o *haptic paddle* [15]. El *haptic paddle* es un dispositivo didáctico de realimentación de fuerzas que dispone de un único grado de libertad, actuado mediante un motor de corriente continua, con un sensor de posición angular y un microcontrolador, generalmente, basado en Arduino. Este tipo de dispositivos ha sido ampliamente probado en labores docentes de robótica, háptica y teleoperación, modelado y simulación de sistemas y programación de entornos virtuales [10, 16, 9, 4, 13, 5].

Si bien existen diferencias entre las distintas versiones, todas las paletas hápticas comparten un a serie de características principales :

- Un grado de libertad: Lo que reduce su coste y complejidad
- Realimentación de fuerzas de tipo impedancia: el dispositivo usa como entradas el par, y devuelve su posición. La fuerza que se presenta al usuario se calcula en base al desplazamiento.
- Motor eléctrico de corriente continua.
- Interfaz de usuario de tipo palanca.
- Control mediante un microcontrolador embebido en tiempo real.

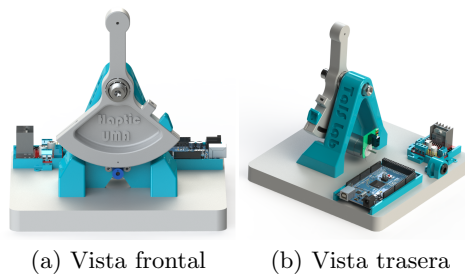


Figura 1: Vista frontal y trasera de los equipos de prácticas utilizados durante el curso 2016/2017

Este artículo presenta las experiencias del uso de la metodología ABP y de programación basada en lenguajes de modelado de dominio específico (simulink) con los *haptics paddle*. Asimismo, se hace una valoración de los resultados obtenidos en base a los modelos docentes aplicados.

El desarrollo e implementación de los haptic paddle se ha realizado en el *TaISLab (Teleoperation and Interactive Systems Laboratory)* del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga [19]. Asimismo, se ha creado un repositorio Github [18] donde se encuentran los archivos y programas relacionados con el proyecto.

El artículo se estructura de la siguiente manera. En la sección 2, se presentan las características de los equipos de prácticas utilizados, así como los detalles de implementación y las metodologías docentes aplicadas. En la sección 3 se describe el entorno de aplicación de los haptic paddle y las distintas técnicas de enseñanza. A continuación se detallan la experiencia y los resultados obtenidos y, por último, se describen las conclusiones.

2. HAPTIC PADDLE DEL TAISLAB

2.1. Características generales

En la figura 1 se muestra la vista lateral y frontal del dispositivo haptic paddle desarrollado para la aplicación de las metodologías docentes que se describen en este artículo.

En la figura 2 se pueden observar algunos de los equipos de prácticas que se han construido para su utilización en la asignatura de Teleoperación y Teilerrobótica del Máster en Ingeniería Mecatrónica de la Universidad de Málaga.

Cada de uno de estos equipos consta de un *haptic paddle* construido mediante técnicas de fabricación aditivas con impresoras 3D comerciales de tecnología FDM (Modelado de Fusión por Depo-

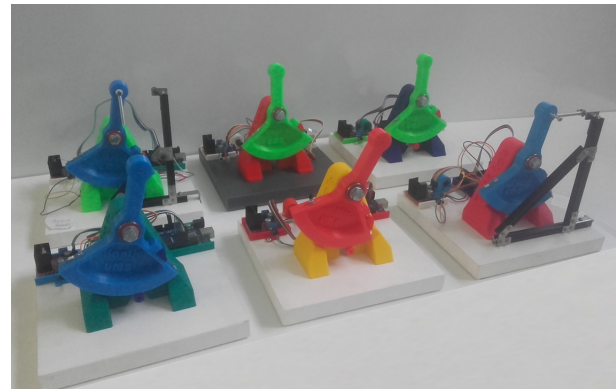


Figura 2: Equipos de prácticas utilizados durante el curso 2016/2017, junto con los dispositivos de calibración utilizados

sición), siguiendo el modelo presentado en [4], que dispone de transmisión tipo *capstan*, un motor de corriente continua *mitsumi* de la serie m25n-2 con un encoder óptico de 448 pulsos por revolución, un Arduino Mega 2560 y una etapa de potencia L298N.

2.2. Modelado de dominio específico y ABP

Uno de los objetivos principales que persigue el uso de estos equipos de prácticas es el uso de la programación basada en modelos de dominio específico, como es el caso de Simulink. El motivo principal es eliminar la necesidad de explicar conceptos de programación, de forma que el profesor se pueda centrar en los contenidos propios de la materia.

Para llevar a cabo las actividades de esta forma, se les ha proporcionado a los alumnos los bloques de lectura del encoder y de actuación y se les han propuesto una serie de prácticas guiadas que les sirvan para familiarizarse con la plataforma Simulink y afianzar algunos conceptos teóricos explicados con anterioridad. Finalmente, se les ha pedido que realicen un proyecto que servirá como trabajo de evaluación de su aprendizaje, siguiendo la metodología ABP.

En el ABP se crea una experiencia de aprendizaje que motiva al estudiante mediante la realización de un proyecto donde se ponen en práctica conceptos ya aprendidos pero que se muestran insuficientes para la resolución del proyecto. Se crea así la necesidad del aprendizaje de nuevos conceptos, donde el profesor posee tan sólo el papel de guía y el estudiante debe tomar un rol activo, desarrollando así capacitaciones que van a requerir en su vida profesional.

Una definición extendida de aprendizaje colabo-

rativo (AC) recogida en [17] lo identifica con la adquisición de destrezas y actitudes que ocurren como resultado de la integración en grupo. Esto es lo deseable para la consecución de los objetivos de aprendizaje fijados en la asignatura, si bien, para que ello ocurra no basta con juntar a los estudiantes sino que es necesario que exista interactividad, sincronía y negociación, tal y como plantea [11], aportando a su vez la siguientes ventajas al estudiante: seguridad en sí mismo, pensamiento crítico, solidaridad, respeto y reducción del individualismo.

El ABP es un estimulante del AC referido a pequeños grupos (dos estudiantes en este trabajo), donde los grupos reciben instrucciones del profesor para lograr el objetivo del proyecto propuesto, y los estudiantes trabajan en su consecución aprendiendo a través de la colaboración. Algunos autores como [12] usan la denominación de Aprendizaje Basado en Proyectos Colaborativo (ABPC) para este caso particular.

Todo ABP debe de cumplir con dos condicionantes: ser interesante para los estudiantes a nivel personal, y cumplir con un fin educativo. El interés de los estudiante se motiva proponiéndoles que ellos mismos creen el enunciado y objetivos del proyecto, mientras que el fin educativo se consigue definiendo los componentes y herramientas a utilizar (haptic paddle) y supervisando que los proyectos propuestos se encuentren dentro de los contenidos de la asignatura.

3. APLICACIÓN DOCENTE

3.1. Asignatura

Los *haptic paddle* se han utilizado en la asignatura *Teleoperación y Telerrobótica* del *Máster en Ingeniería Mecatrónica* de la *Universidad de Málaga* durante el segundo cuatrimestre del curso 2016-17. La asignatura cuenta con 14 alumnos, por lo que se han dispuesto 8 equipos de prácticas, y los alumnos han formado equipos por parejas o individuales. En la imagen de la figura 3 se observa el uso por parte de los alumnos de los dispositivos de prácticas durante la primera semana de prácticas, donde los propios alumnos efectúan el ensamblado mecánico de los dispositivos. En la figura 4 se pueden ver algunos alumnos de la asignatura y los autores.

La primera parte de la asignatura incluye temario teórico (Véase tabla 1) donde se incluye un resumen del temario.

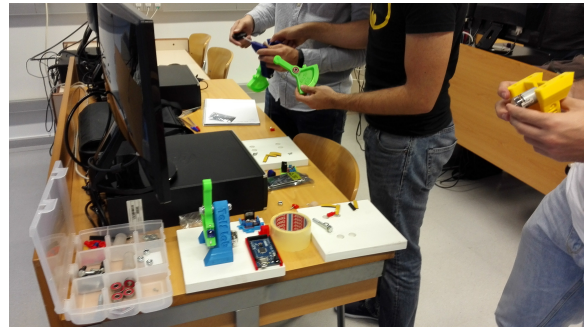


Figura 3: Montaje de los equipos por parte de los alumnos durante una sesión de prácticas



Figura 4: Alumnos de la asignatura Teleoperación y Telerrobótica del Máster en Ingeniería Mecatrónica de la Universidad de Málaga, junto a los autores de este artículo durante una sesión de prácticas con los *haptic paddle*

Tabla 1: Temario resumido de la asignatura de teleoperación y telerrobótica.

Semana	Tema
1	Introducción a la Teleoperación y la Telerrobótica
2	Haptics
3	Problemas y Métodos de Teleoperación
4	Sistemas Bilaterales
5	Retardos y métodos de evitación de los efectos
6	Métodos telerrobóticos
7-12	Proyecto tutorizado
13	Presentación de proyecto y evaluación

3.2. Conocimientos previos al uso de los equipos

Dado que la asignatura pertenece al segundo semestre del máster, se pueden presuponer ciertos conocimientos que los alumnos ya deben haber adquirido, o bien en el primer cuatrimestre de dicho máster, o bien a lo largo del grado que hayan realizado previo a su incorporación al máster. Los alumnos, por tanto, poseen conocimientos de programación hardware en lenguajes como C/C++, que conocen el entorno de Matlab y Simulink, con los que han desarrollado prácticas previamente en otras asignaturas del máster, conocimientos técnicos de electrónica relativos al uso de microcontroladores, sensores y actuadores, así como de teoría y estrategias de control y modelado de sistemas mecatrónicos.

3.3. Organización del programa de prácticas

La asignatura de Teleoperación y Telerrobótica se desarrolla a lo largo de 13 semanas, de las cuales las seis últimas se han dedicado al desarrollo del proyecto de alumnos. Cada semana cuenta con dos sesiones de 1.5 h, de las cuales la primera incluye presentaciones teóricas del profesor introduciendo los objetivos de la semana y proporcionando los métodos y materiales de trabajo, y la segunda es exclusivamente de trabajo tutorizado del alumno, tal como se resume en la tabla 2.

3.4. Proyectos derivados de la aplicación de la metodología ABP

Para la realización de proyectos, los alumnos se han organizado por grupos y se les ha pedido que diseñen sus propios proyectos. Los diferentes proyectos diseñados se recogen en la tabla 3.

Los proyectos han sido refinados con la ayuda del profesor para tener en cuenta las limitaciones de los dispositivos y del tiempo disponible para su realización.

4. EVALUACIÓN Y RESULTADOS

La evaluación de la asignatura se compone de la evaluación de otras prácticas realizadas durante el curso, del resultado de un cuestionario, y de la evaluación de los resultados del proyecto.

Los resultados de los proyectos son defendidos mediante una breve presentación en la sesión de evaluación, junto con una demostración de su funcionamiento. Todos los proyectos, han alcanzado los objetivos y han superado correctamente las prue-

bas. No obstante existen diferencias en la complejidad del proyecto que hacen que se puntúen en mayor medida unos proyectos sobre otros.

Para evaluar de manera objetiva el efecto del uso de los haptic paddle como herramienta para el aprendizaje basado en proyectos, se ha utilizado un cuestionario con preguntas relacionadas con los dispositivos hápticos, que se formuló a alumnos del curso 2015/16 que no usaron este dispositivo, y a alumnos del curso 2016/17 que sí lo han utilizado como equipo de prácticas en su proyecto de la asignatura de Teleoperación y telerrobótica del Máster de Ingeniería Mecatrónica. No obstante, durante ambos cursos se han realizado también prácticas de otro tipo con dispositivos hápticos comerciales (Falcon) de tres grados de libertad, utilizando el lenguaje de programación LabVIEW.

El cuestionario está compuesto por trece preguntas de tipo test, con cuatro posibles respuestas en relación a los dispositivos hápticos: frecuencias de actualización, tipos de señales de entrada/salida, factores que influyen en su rendimiento, etc. Los resultados del cuestionario ofrecen una calificación media muy superior en el caso del curso 2016/17 (8.2 sobre 10) sobre el curso en el que no se utilizó (5.2 sobre 10), si bien el número de sesiones dedicado a trabajar sobre el tema se ha incrementado. En la figura 5 se muestra la comparación de las calificaciones medias por pregunta.

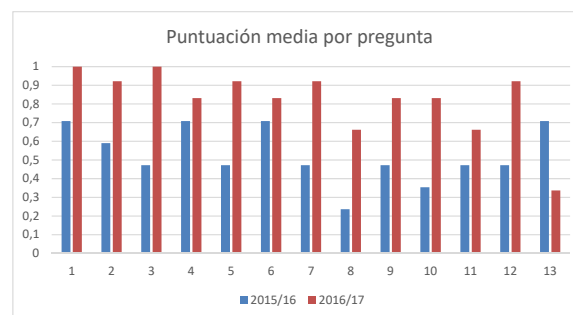


Figura 5: Resultados de la evaluación objetiva. Puntuaciones medias de cada una de las preguntas del test durante el curso en el que no se han usado los *haptic paddle* (2015/16) y en el que sí se han utilizado (2016/17) como plataforma para educación basada en proyectos

5. CONCLUSIONES

El uso de estos equipos docentes motiva en gran medida a los estudiantes y a los profesores, que junto con el uso del ABP y el permitir a los alumnos diseñar su propio proyecto aumentan dicha motivación. Esta diversidad en los proyectos debe ser supervisada por el profesor, pero aumenta la cohesión del grupo y mejora el aprendizaje co-

Tabla 2: Organización de sesiones prácticas del asignatura de Teleoperación y Telerrobótica. Cada semana incluye dos sesiones de 1.5h. La primera incluye presentaciones del profesor y la segunda es exclusivamente trabajo tutorizado del alumno.

Semana	Sesión 1	Sesión 2	Objetivos
7	Presentación del proyecto <i>Haptic Paddle</i>	Ensamblado mecánico	Dispositivo ensamblado
8	Electrónica de control y conexión	Conexión y test del sistema de control	Ejecución de los programas de test
9	Introducción a la programación del <i>Haptic Paddle</i> mediante <i>simulink</i>	Programación de modelos dinámicos	Ejemplo de muelle y fricción
10	Métodos y dispositivos de calibración de par y lectura de ángulo	Programación de bloques con magnitudes reales	Bloques con magnitudes reales
11	Diseño de proyectos. reglas, ideas y limitaciones	Diseño de proyecto	prototipo de proyecto
12	Proyecto	Documentación	vídeos, programas (modelos) y demostraciones

Tabla 3: Conjunto de proyectos diseñados por los diferentes grupos de prácticas.

Gr.	Título	Objetivos
1	Péndulo invertido	Programación de la dinámica de un péndulo invertido con visualización gráfica bidimensional.
2	Angry Haptics	Programación de un sistema compuesto por dos haptic paddle donde uno de ellos controla el lanzador y otro la recepción en una plataforma.
3	Rehabilitación de muñeca	Sistema de ejercicios con fuerzas progresivas en secuencia para la realización controlada de ejercicios de rehabilitación física.
4	Control de bola en plataforma	Control de la posición unidimensional de una bola sobre una plataforma pivotante con reflexión de fuerzas.
5	3D pong	Juego en el que se hace botar verticalmente una pelota con una raqueta y visualización 3D.
6	Haptic transparente	Compensación de la dinámica de la paleta y simulación de un péndulo rígido con fuerzas externas.

laborativo.

La relativa simplicidad del dispositivo permite llevar a la práctica teorías de modelado de sistemas dinámicos y de control fácilmente, y su bajo coste permite desplegar un conjunto de dispositivos para poder crear grupos de uno o dos estudiantes por grupo. Asimismo permite que los estudiantes construyan sus propios haptics o que se lleven a casa los equipos.

Como valoración general, consideramos que se ha mejorado la docencia en la asignatura mediante unas herramientas atractivas para los alumnos, que les proporcionan unos conocimientos prácticos y teóricos que son comprobados mediante los resultados de los cuestionarios objetivos.

Las siguientes aplicaciones docentes de estos sistemas podrían encaminarse a su uso en otras asignaturas como *Modelado y control* o *Control automático*, donde pueden ser de gran ayuda al

aprendizaje.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido parcialmente financiado por el proyecto de Innovación educativa de la Universidad de Málaga PIE 15-180, por Seed Studio (seedstudio.com) e Ingeniería UNO (ingenieriauno.com).

Además, se agradece la colaboración de Sepehr Akbari Kalhor en los diseños de los prototipos, así como a todos los alumnos de la asignatura de Teleoperación y Telerrobótica del Máster de Mecatrónica.

Referencias

- [1] Cabre, T. P., Cairol, M. T., Calafell, D. F., Ribes, M. T., and Roca, J. P. (2013). Project-based learning example: controlling an educational robotic arm with computer vision. *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*, 8(3):135–142.
- [2] Cappelleri, D. J. and Vitoroulis, N. (2013). The robotic decathlon: Project-based learning labs and curriculum design for an introductory robotics course. *IEEE Transactions on Education*, 56(1):73–81.
- [3] Carbonaro, M., Rex, M., and Chambers, J. (2004). Using lego robotics in a project-based learning environment. *The Interactive Multimedia Electronic Journal of Computer-Enhanced Learning*, 6(1).
- [4] Gandarias Palacios, J. M., Akbari Kalhor, S., and Gómez de Gabriel, J. M. (2016). Diseño y uso de una paleta háptica para prácticas de teleoperación con simulink.
- [5] Gassert, R., Metzger, J.-C., Leuenberger, K.,

- Popp, W. L., Tucker, M. R., Vigar, B., Zimmermann, R., and Lambercy, O. (2013). Physical student-robot interaction with the ethz haptic paddle. *IEEE Transactions on Education*, 56(1):9–17.
- [6] Gil, J., Muñoz, A., Torres, V., and Gómez, J. (2014). Uso de simulink y arduino para prácticas de robótica. *XXXV Jornadas de Automática. Valencia*.
- [7] Gomez-de Gabriel, J. M., Mandow, A., Fernandez-Lozano, J., and Garcia-Cerezo, A. J. (2011). Using lego nxt mobile robots with labview for undergraduate courses on mechatronics. *IEEE Transactions on Education*, 54(1):41–47.
- [8] Gómez de Gabriel, J. M., Muñoz Ramírez, A. J., and Fernández Lozano, J. J. (2015). Ingeniería basada en modelos en prácticas de robótica. *XXXVI Jornadas de Automática. Bilbao*.
- [9] Gorlewicz, J. L., Kratchman, L. B., and WEBSTER III, R. J. (2014). Haptic paddle enhancements and a formal assessment of student learning in system dynamics. *Advances in Engineering Education*, 4(2).
- [10] Gorlewicz, J. L. and Webster III, R. J. (2012). A formal assessment of the haptic paddle laboratories in teaching system dynamics. In *American Society for Engineering Education*. American Society for Engineering Education.
- [11] Johnson, D., Johnson, R., and Johnson, E. (1999). *Los nuevos círculos del aprendizaje La cooperación en el aula y la escuela*. Aique.
- [12] Maldonado Pérez, M. (2008). Aprendizaje basado en proyectos colaborativos. Una experiencia en educación superior. *Revista de Educación*, 14(28).
- [13] Martinez, M. O., Morimoto, T. K., Taylor, A. T., Barron, A. C., Pultorak, J. A., Wang, J., Calasanz-Kaiser, A., Davis, R. L., Blikstein, P., and Okamura, A. M. (2016). 3-d printed haptic devices for educational applications. In *Haptics Symposium (HAPTICS), 2016 IEEE*, pages 126–133. IEEE.
- [14] Muñoz Ramírez, A. J. and Gomez De Gabriel, J. M. (2016). Modelar o programar en prácticas de robótica. *XXXVII Jornadas de Automática. Madrid*.
- [15] Okamura, A. M., Richard, C., Cutkosky, M., et al. (2002). Feeling is believing: Using a force-feedback joystick to teach dynamic systems. *Journal of Engineering Education*, 91(3):345–349.
- [16] Rose, C. G., French, J. A., and O'Malley, M. K. (2014). Design and characterization of a haptic paddle for dynamics education. In *Haptics Symposium (HAPTICS), 2014 IEEE*, pages 265–270. IEEE.
- [17] Salinas, J. (2000). El aprendizaje colaborativo con los nuevos canales de comunicación. In Cabero, J., editor, *Nuevas Tecnologías aplicadas a la Educación*, pages 199–228. Síntesis.
- [18] TaisLab. <https://github.com/taislab/haptic-paddle>. <http://taislab.uma.es>.
- [19] TaisLab. Universidad de Málaga. <http://taislab.uma.es>.

REPRESENTACION INTEGRADA DE ACCIONAMIENTOS MECANICOS Y CONTROL DE EJES ORIENTADA A LA COMUNICACIÓN Y DOCENCIA EN MECATRONICA

Julio Garrido Campos

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. E.I. Industriales, Campus Lagoas Marcosende, 36200, Universidad de Vigo, jgarri@uvigo.es

David Santos Esterán, Juan Sáez López, José Ignacio Armesto Quiroga

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. E.I. Industriales, Campus Lagoas Marcosende, 36200, Universidad de Vigo, marin@uvigo.es, juansaez@uvigo.es, armesto@uvigo.es

Resumen

La aproximación “mecatrónica” al diseño y realización de máquinas hace un uso extensivo de tecnologías electrónicas para el control y coordinación de ejes mecánicos permitiendo que el control realice funcionalidades que antes eran hechas únicamente por los elementos mecánicos. Sin embargo, los métodos existentes para representar estas dos vistas tecnológicas (mecánica y electrónica/lógica) se han ignorado mutuamente, paralelamente a lo que sucedía con los perfiles docentes y profesionales correspondientes: mecánico y automático. Esto, desde el punto de vista docente, complica por ejemplo la descripción pedagógica de sistemas mecánicos servoaccionados con todos los requerimientos propios de una solución mecatrónica conjunta. Este artículo desarrolla un nuevo modelo de representación de diseños mecatrónicos que integre efectivamente ambas vistas tecnológicas. El uso de esta metodología facilitará la comunicación entre diseñadores mecánicos y diseñadores de control, así como la introducción de restricciones mecánicas en docencia de control y viceversa.

Palabras Clave: Mecatrónica, Modelado, Docencia en ingeniería.

1 INTRODUCCION

La creación de máquinas es un proceso que conjuga de conocimientos de diferentes áreas. En algunos casos, como las máquinas con servoejes, la interacción e interdependencia entre la mecánica y control puede ser muy elevada. La posibilidad de definir en tiempo de funcionamiento, relaciones cinemáticas temporales entre ejes, así como el uso de ejes virtuales asociados a ejes reales y levas electrónicas entre otras técnicas, simplifica el diseño mecánico a costa de aumentar el del control. Distribuyendo así la complejidad de la aplicación en dos campos que deben estar perfectamente integrados

para obtener una solución óptima difícil de alcanzar con un enfoque monodisciplinar.

Consecuencia de una mayor integración es la posibilidad de simplificar y reducir las transmisiones mecánicas, obteniendo como resultado sistemas más eficientes energéticamente y aumentado aún más dicha flexibilidad. La documentación e intercambio de información de un problema multidisciplinar con una solución multidisciplinar requiere de un sistema de representación común que sirva como base.

La ingeniería gráfica dispone de diferentes técnicas de representación muy adecuadas para cada campo. Pero actualmente, cada disciplina tiene los suyos propios. Todos ellos evolucionaron de forma prácticamente independiente del resto, con objetivos y resultados diferentes por ello no se tienen en consideración los unos a los otros. Por ejemplo, el dibujo técnico de planos mecánicos tiene como finalidad la fabricación, montaje y ensamblaje de sistemas mecánicos, no tiene previsto métodos para representar su relación con el sistema de control. Por ejemplo, se puede dibujar el servomotor y eje que acciona, pero sigue faltando mucha información, como a que posiciones se va a mover, a que velocidades, etc. Por otro lado, los lenguajes de programación, se emplean para abstraer de las complejidades del código máquina o ensamblador. Y salvo comentarios de texto en el código fuente tampoco tienen métodos para representar su relación con el sistema mecánico que controlan. Por ejemplo, un servoeje, no es más que otra variable pero a diferencia de otras, cambios en su valor implica un movimiento de un objeto físico.

Así pues, se presentan dos opciones, modificar estándares existentes o crear uno nuevo. En este artículo se estudia la segunda opción. Este nuevo sistema de representación se podría ver como una combinación de los principales sistemas de representación empleados en el diseño de maquinaria. Pero presentando únicamente aquellas informaciones comunes y relevantes para todas las

partes, obviando lo que se considerarían detalles para el resto.

La dificultad reside en seleccionar ese conjunto de información común relevante y descartar el resto y combinar normas como son la ISO128 [1], ISO3952 [2], PLC-Open for Motion Control [3] en una metodología que presente la información de forma conjunta y fácilmente interpretable para especialista de las diferentes áreas implicadas. Este artículo desarrolla un nuevo modelo de representación de diseños mecatrónicos teniendo en cuenta estas consideraciones: MMCS (*Mechanical and Motion control Schematics*).

No se pretende en este artículo hacer una propuesta formal ni al detalle de una nueva norma pero si proponer una serie de fundamentos metodológicos.

2 TECNICAS DE DISEÑO GRAFICO EMPLEADAS EN EL DISEÑO MECANICO DE EJES CONTROLADOS.

Para la revisión de las diferentes normas utilizadas en la ingeniería gráfica, desde el campo mecánico y de control, se han agrupado estas normas en tres apartados que se desarrollan a continuación, Dibujo Técnico, Lenguajes de Programación y Otras normas de interés.

2.1 DIBUJO TECNICO

Este apartado engloba los diferentes sistemas de representación gráfica empleados en arquitectura, topografía, electricidad y otras muchas ramas de la ingeniería incluyendo la mecánica. Cuenta con numerosas normas y estándares que regulan diferentes aspectos. Por ejemplo la parte 20 de la ISO128 [1] detalla convenios generales para las líneas, la ISO 5455 [4], las escalas, la ISO 6433 [5] referencias de los elementos, etc. Su uso es amplio, aceptado y presente en la literatura y documentación científica y técnica.

Los dibujos se suelen clasificar en croquis o planos. Se emplean proyecciones o vistas de los objetos haciendo uso de escalas. Mediante el uso de cotas y otros símbolos se añade más información.

2.1.1 Planos mecánicos.

A su vez existen diferentes tipos de planos. Por ejemplo, en el caso de la ingeniería mecánica, si se trata de un plano para la fabricación de una pieza se incluirán además tolerancias de fabricación, acabados, materiales, etc. Los servoaccionamientos,

en cualquiera de sus variedades, husillo, correa, piñón-cremallera, rotativo, etc. pueden aparecer en cualquiera de estos tipos planos. Estos pueden detallar componentes individuales como guías, rodamientos, carro, servomotor, etc. o pueden aparecer como un conjunto dentro de una envolvente al estilo de los módulos lineales.

Los detalles concretos de esos componentes, fundamentales para el diseño mecánico, no lo son sin embargo para el control. Además, este tipo de planos son representación con una orientación demasiado estática, no se identifican claramente los elementos móviles. Tampoco se especifican los sistemas de referencia ni las cotas empleadas para la descripción de los de movimiento a realizar. Por ejemplo, el acoplamiento de una parte móvil con aquellas a las que traslada se tiene que deducir de la interpretación de la construcción y ensamblaje de las propias piezas. Esto entraña cierta dificultad en caso de no estar familiarizados con estos tipos de planos o si la máquina es compleja.

Además, los planos mecánicos se limitan a la especificación de condiciones geométricas, pero no establecen condiciones cinemáticas o dinámicas. Los elementos eléctricos como finales de carrera o sensores de *homing* se pueden representar en su versión mecánica pero sin especificar su función o identificación según normas eléctricas.

En la Figura 1 se puede ver un plano mecánico de un módulo lineal de correa comercial [6]. Para el sistema de control la información relevante se limita:

- A la carrera efectiva, en este caso la cota L menos el ancho del carro móvil.
- Y el punto concreto del carro móvil o herramienta o útil, respecto del cual se va a medir la posición, que se usará como realimentación para el sistema de control.

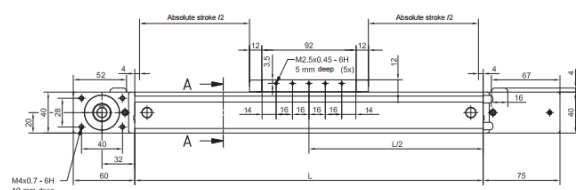


Figura 1 Vista lateral del plano mecánico de un módulo lineal de correa

2.1.2 Esquemas cinemáticos.

En el estándar ISO 3952 [2] define un sistema de símbolos gráficos orientado a la representación simplificada de sólidos rígidos y las relaciones mecánicas entre ellos que definen un mecanismo. Esta norma no tiene en cuenta detalles constructivos

como los que se puede encontrar en planos mecánicos. En la Figura 2 pueden verse ejemplos típicos de esta norma. En la Figura 3 puede observarse los símbolos propuestos por esta norma aplicable al módulo lineal de la Figura 1.

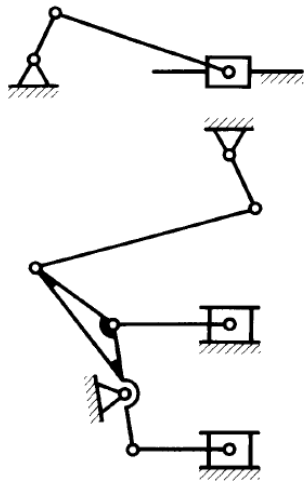


Figura 2 Ejemplos de diagramas cinemáticos según norma ISO 3952

2.1.2	Unión deslizante	Unión de dos miembros que permite el movimiento rectilíneo de un miembro con relación al otro			
-------	------------------	---	--	--	--

Figura 3 Símbolo de la norma ISO3952 para representación de movimientos lineales

Esta simplificación elimina información importante para proceder al diseño detallado y fabricación como son cotas, medidas, acabados, etc. Los sistemas de referencia y coordenadas en esta norma se usan con fines de modelado. En la literatura se pueden encontrar ejemplos donde se combina esta representación simbólica en aplicaciones de servoaccionamientos [7] [8]. También se hace uso de ella para representación esquemática de CNC, como por ejemplo en [9].

Pese a tener una orientación hacia la cinemática y dinámica del sistema, la norma carece de una simbología para incluir vínculos temporales entre partes móviles creada por el sistema de control. Añade detalles innecesarios para el sistema de control, como son los tipos de pares que existen entre los enlaces de los elementos mecánicos. Aunque su uso no está tan extendido como en el caso de los planos mecánicos, se pueden encontrar en la literatura trabajos en donde se hace uso de una representación esquemática de ejes lineales a la que se añaden detalles necesarios para la exposición de las ideas a tratar [10] [11] [12] [13] [14].

2.2 LENGUAJES DE PROGRAMACION PARA CONTROL MULTIEJE: PLC_OPEN FOR MOTION CONTROL

Las ordenes, secuencias de movimientos y relaciones a los servoaccionamientos se describen comúnmente mediante recursos de los lenguajes de programación. Existen múltiples soluciones para implementar y describir el funcionamiento de las máquinas. El estándar más importante es el IEC 61131-3, [3] que propone diferentes lenguajes de programación, Ladder Diagram (LD), Structured Text (ST), Instruction List (IL), Function Block Diagram (FBD) y Sequential Flow Chart (SFC). Su uso está muy extendido y es ampliamente aceptado tanto por usuarios como por fabricantes de equipamiento.

El IEC 61131-3 fue adoptado por PLC-Open [15], que lo amplió especificando, entre otras, un conjunto de librerías de bloques de función para el control de ejes [16] (*Motion Control*). Esta norma define, pero no implementa, un conjunto de FBs (bloques de función) para programar el control de servoaccionamientos. Abarca desde movimientos simples, PTP (punto a punto) hasta complejos movimientos coordinados que crean relaciones virtuales/lógicas entre ejes de formas equivalentes a su realización mecánica, como por ejemplo engranajes, levas mecánicas, etc. Estas relaciones software puede activarse y alterarse durante el funcionamiento de la máquina cambiando el estado lógico de los ejes con efecto en la mecánica.

El comportamiento de los ejes de la máquina resulta de la ejecución de una secuencia de estas instrucciones, ejecutadas por un PLC. En los comentarios del programa se podrían añadir información sobre lo que hace pero si la mecánica es compleja la descripción sería complicada y dada malas interpretaciones sin contar con algún tipo de plano mecánico o similar.

La interpretación de un programa de estas características puede ser muy complicada incluso para especialistas en la materia. Los programas de control de ejes no tienen asociado ningún tipo de representación gráfica explicitando la relación con la vista mecánica, salvo graficas de parámetros fundamentales de los ejes como velocidad y posición. Además, las instrucciones contienen información irrelevante para el sistema mecánico, como son los nombres de las instancias lógicas, variables, tipos de datos, detalles sobre la ejecución, etc. Los programas de control de ejes actuales emplean frecuentemente ejes virtuales. Es decir, ejes lógicos que no tienen asociado ningún servoaccionamiento físico real. También se pueden usar con ejes auxiliares, *encoders* aunque no tengan accionamiento asociado.

2.3 OTRAS NORMAS

Existen otras normas de interés que tienen una relación tangencial con el tema expuesto en este artículo y que se comentan brevemente a continuación, pues de algunas de ellas se utilizan conceptos e ideas.

Es el caso de la norma ISO 841 [17], específica de CNC, describe la metodología para nombrar los diferentes ejes que componen dichas máquinas así como los sentidos y direcciones de dichos ejes. Por ejemplo, un sistema cartesiano de tres ejes perpendiculares es notaría por XYZ. Un segundo sistema UVW. En caso de ejes paralelos se puede usar notación X1, X2, etc. Para ejes rotativos A, C, D perpendiculares a X, Y, Z. Su principal limitación para la representación integrada de mecánica y control se debe a que en este tipo de máquinas las relaciones lógicas entre los ejes están preestablecidas.

Existen otras normas de representación donde aparecen componentes relacionados con los servoaccionamientos, como las normas de planos eléctricos, pero muy orientadas a especificar las conexiones entre los varios componentes que conforman el accionamiento eléctrico.

Otros ejemplos de normas con una relación tangencial serían la ISO 369 [18], consistente en una lista de iconos que pretenden estandarizar la representación de diferentes operaciones en los IHM de los controles de los CNCs; la ISO 2203 [19], signos para engranajes, es otra norma aplicable a elementos típicos de cadenas cinemáticas de servo ejes, como engranajes dentados de reductoras pero tiene un enfoque muy mecánico. De otras normas como la ISO [20] para neumática se podría tomar símbolos como ventosas o pinzas. Incluso información que no esté bajo ninguna norma también puede ser útil para complementar y detallar el funcionamiento como por ejemplos cronogramas o gráficas con las curvas de las levas electrónicas.

2.4 REPRESENTACIONES NO ESTANDARD

El sistema S5 es un robot manipulador para transferir. En general los fabricantes de componentes mecánicos como reductoras, guías, módulos lineales, hacen uso de las normas gráficas. Complementan la información con tablas de características, fotos o vista en tres dimensiones, etc. Este tipo de información también la incluyen los fabricantes de equipamiento electrónico así como su representación simbólica.

Para encontrar alguna representación mecatrónica de los servoaccionamientos hay que buscar en los manuales de usuario de los controladores y las

herramientas de programación con funcionalidad para manejar servoaccionamientos. Aquí hay dos soluciones, las basadas en PLC-Open y las propietarias. Las primeras ya se han comentado, simplemente destacar que en ocasiones se acompañan de representaciones esquemáticas de la mecánica, sin atender a ningún estándar, y de cronogramas [21] [22] [23]. Confirmando de otra forma la necesidad del sistema de representación aquí propuesto. En el segundo grupo hay herramientas de programación gráfica que mezclan los diagramas de estados con órdenes de control ejes acompañadas de unos iconos para hacer más fácil la interpretación [24]. Pero en cualquier caso se limita al ámbito software y no trasciende a la mecánica.

También se pueden encontrar representaciones que no atienden a ninguna norma pero que cumplen su función mediante esquemas simples o representaciones 3D, como por ejemplo [25] [26] [27]

3 DESARROLLO DE LA PROPUESTA.

En la Tabla 1, a modo de resumen, se presentan indicando las ventajas, limitaciones y el ámbito de uso, de los principales métodos de representación que se pueden emplear en el diseño de máquinas con servoaccionamientos.

Todos los sistemas tienen sus ventajas pero las limitaciones son demasiado importantes requiriendo de una modificación tan sustancial que desvirtuaría el objetivo inicial del sistema de dibujo o lenguaje de programación. Por ello se opta por plantear un nuevo sistema de representación. Aunque reutilizando en la medida de lo posible las normas existentes ya que así se harán más sencillo el trabajo y el intercambio de información aprovechando la familiaridad y experiencia previa con las técnicas y normas conocidas.

3.1 EJE LINEAL

El eje lineal (Figura 4) es uno de los casos más simples. En la Figura 5: Eje lineal de husillo se representa un módulo lineal. Se puede identificar el servomotor, la campana de acoplamiento, el carro móvil y el cuerpo del módulo en cuyo interior se encuentra el husillo, rodamientos y las guías con los patines. En la Figura 1 se presentó un plano mecánico detallado.

Tabla 1. Comparativa sistemas de representación.

Ambato	Información relevante común	Limitaciones	Ventajas
Diagramas cinemáticos	Elementos móviles, relación entre ellos, trayectorias	Visita 2D, cotas. Información excesiva sobre pares mecánicos, tipo de componente, etc.	Sencillez, interpretación visual rápida de elementos móviles y sus relaciones.
Planos mecánicos	Cotas y medidas de desplazamiento elementos móviles. Sistemas de referencia de posición.	Interpretación cinemática confusa debido a exceso de información relativa a cotas, materiales, acabados tanto de elementos fijos como móviles.	Información precisa de cotas y medidas. En concreto de los elementos móviles. Referencias de posición respecto a la máquina real.
CNC	Notación de ejes	Orientado máquinas CNC, diseños y cinemáticas concretos y definidos de antemano	Norma de amplio uso que se puede adoptar parcialmente sin problemas.
Programación	Relación entre ejes, secuencia de movimientos, detalle tipo de movimiento.	Ningún tipo de referencia, salvo opción de comentarios en código a la mecánica. Detalles de la implementación del código sobrantes, como nombres variables, condiciones lógicas, control de otros sistemas de la máquina, etc.	Describe la secuencia de movimientos de la máquina. La relaciones cinemáticas temporales, engranajes electrónicos, levas electrónicas, ejes virtuales, etc. Difícil interpretación para no programadores.

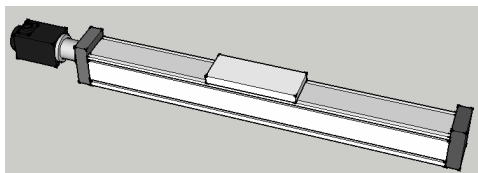


Figura 4: Vista lateral del eje lineal y sus sucesivas simplificaciones

Se propone usar la letra “O” mayúscula, para notar el origen del eje y una flecha con un signo + o -, según convenga para indicar el sentido (Figura 6). Una vez se tiene representado el punto desde el que se va a realizar la medida hay que indicar el segundo punto. Que bien podría ser un extremo del carro móvil, el punto medio, un punto notable de la herramienta que transporta.

Puesto que estos planos deberían ser zona común entre diseño mecánico y programación, las cotas deberían indicarse como variables cuyo nombre pueda ser empleando en el propio código del programa PLC-Open, aplicando para ello las restricciones que la norma aplica a los nombres de las variables. Este es un aspecto importante del modelo

porque de una manera fácil se puede asociar la información del plano con el código del programa automatización.

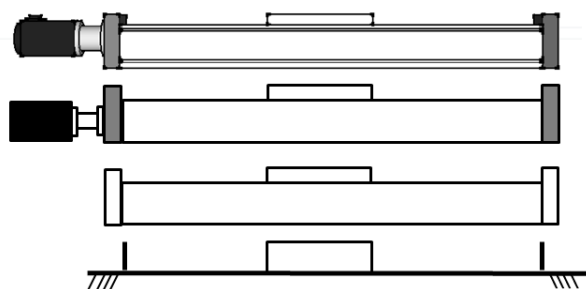


Figura 5: Eje lineal de husillo

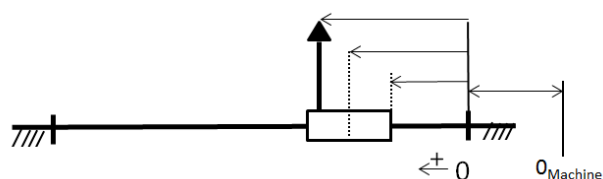


Figura 6: Diferentes puntos sobre los que medir la posición del eje

Se propone por ejemplo, que las distancias usen el prefijo “D” seguido del identificador del punto de origen y el punto de medida. Por ejemplo “D_Omachine_Tool” que sería la distancia entre el “cero máquina” y el punto de aplicación de la herramienta. Estos esquemas mecánicos y control de ejes o MMCS (*Mechanical and Motion control Schematics*) se podrían combinar con el código fuente mediante un simple comentario en el código. Por ejemplo, el siguiente programa, activa un eje, lo referencia a una posición concreta para después ejecutar un movimiento absoluto referido a dicha origen y finalmente un movimiento relativo a la anterior posición. En los comentarios se indica que MMCS se debe consultar para aclarar detalles y casar las órdenes de control con la mecánica.

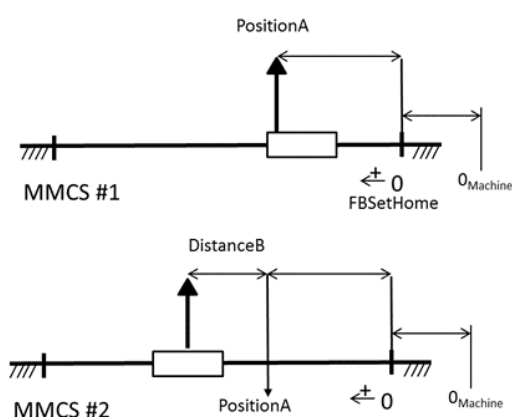


Figura 7: Ejemplo

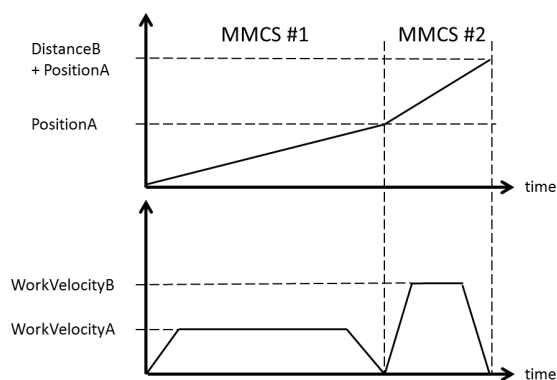


Figura 8: Cronograma ejemplo eje lineal
En la Figura 7 se muestran los MMCS que representan la operación de referenciado y los dos movimientos (Figura 8).

3.2 DOS EJES PARALELOS, EJE VIRTUAL

Otro ejemplo de dos ejes, son las configuraciones en Gantry (Figura 9).

Se trata de dos o más ejes paralelos que se desplazan de forma sincronizada para transportar una estructura solidaria a los carros móviles. Es claro que si la diferencia de posición de ambos carros es excesiva la estructura se torcería y quedaría bloqueada.

Para minimizar la diferencia de posición entre los ejes estos tienen que estar sincronizados. Un eje recibiría las órdenes de movimiento y haciendo de maestro sobre el segundo eje, que sería el esclavo y se moverían sincronamente.

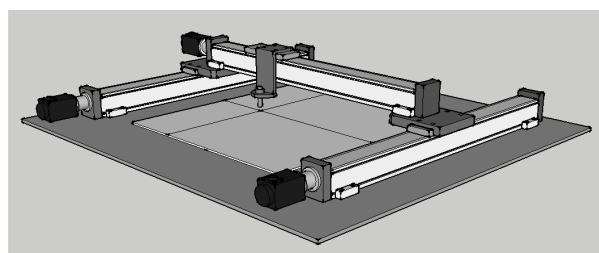


Figura 9: Sistema de ejes con dos ejes paralelos en configuración Gantry.

La relación maestro-esclavo, es una condición cinemática temporal creada por software. El controlador de ejes, lee la posición el eje maestro y la utiliza como posición de destino para el eje esclavo. En el identificador del eje maestro se indicaría con una letra M seguida de los ejes esclavos. Y en el eje esclavo, una S seguida del identificador el eje maestro. Por ejemplo X_MY, es decir, eje X maestro de eje Y. Y a su vez Y_SX (Figura 11).

El tiempo que tarda en leerse la posición del eje maestro y transmitírsela al eje esclavo, produce un retardo que tiene como consecuencia que el esclavo se posicione en una posición en la que el maestro ya no está. Generándose una diferencia entre ambos.

Una posible solución es el uso de ejes virtuales. Los ejes virtuales son ejes lógicos, con un comportamiento teórico e ideal que no tienen asociado accionamiento ni mecánica real.

```

FBPowerAxis( axis:=LinearAxis1, enable:= PowerLinearAxis1);

// Homing mechanics reference details MMCS#1
FBSetHome( axis:= LinearAxis1, execute:= FBPowerAxis.Status AND DoHomeAxis);

// Move absolute axis to point A, (details MMCS#1)
FBMoveToPointA( axis:=LinearAxis1, execute:= (LinearAxis1.Details.Homed AND MoveToA),
                Position:=PositionA, Velocity:= WorkVelocityA);

// Move relative axis a distance B, (details MMCS#2)
FBMoveDist ( axis:=LinearAxis1, execute:= FBMoveToPointA.Done,
             Distance:= DistanceB, Velocity:=WorkVelocityB);

```

Figura 10: Homing y posicionado.

Surge por tanto la necesidad de representar en un plano de naturaleza mecánica un recurso que solo tiene representación lógica dentro del control de ejes. Se propone representarlos de forma similar a los ejes reales, pero con línea discontinua y puesto que no tiene carro móvil asociado un rombo o flecha. Se notaría con prefijo V y seguirían las mismas normas de notación que los ejes reales teniendo en cuenta su posición virtual en la máquina. De esta forma el ejemplo virtual maestro de los dos ejes reales se notaría como VX_MX1_MX2.

El código en ST de PLC-Open que establecería las relaciones entre el eje virtual y los esclavos junto con una orden de movimiento quedaría de la siguiente forma (Figura 12). Aunque un eje solo puede ser esclavo de un único maestro en un momento dado, podría serlo de diferentes maestros en diferentes momentos. En este caso, se podrían indicar en el nombre del eje esclavo los de los maestros, solo los de maestro que mayor tiempo ejerza el control o ninguno. También se puede plantear que si la relación maestro-esclavo tiene una duración temporal escasa respecto al tiempo total, obviar la indicación.

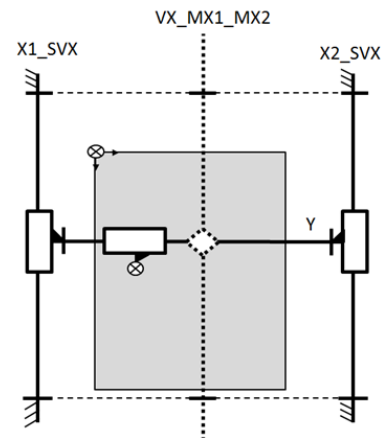


Figura 11: Vista superior del sistema Gantry.

4 SUMARIO Y CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un sistema de representación preliminar para la representación de sistemas básicos de control de ejes: M.MCS (*Mechanical and Motion control Schematics*).

```

FBPowerX1( axis:=X1_SVX, enable:=ActivateAxis); // MC_Power to axis X1
FBPowerX2( axis:=X2_SVX, enable:=ActivateAxis); // MC_Power to axis X2
FBPowerY( axis:=Y, enable:=ActivateAxis); // MC_Power to axis Y

// MC_GearIn, function Blocks for activate Master-Slave control between VX and X1 and X2
// See details MMCS #3
FBGearIN1( master:=VX_MX1_MX2 ,slave:=X1_SVX, execute:=ActivateGearVX_X1_X2,
            RatioNumerator:=1, RatioDenominator:=1, ReferenceType:=_eMC_REFERENCE_TYPE#_mcFeedback);

FBGearIN2( master:=VX_MX1_MX2 ,slave:=X2_SVX, execute:=ActivateGearVX_X1_X2,
            RatioNumerator:=1, RatioDenominator:=1, ReferenceType:=_eMC_REFERENCE_TYPE#_mcFeedback);

// MC_MoveAbsolute, function block to move VX and because of previous MC_GearIn, synchronously X1 and X2
FBMoveVX( axis:=VX_MX1_MX2, execute:= (MoveX1_X2 AND FBGearIN1.InGear AND FBGearIN2.InGear),
          position:= PositionDestinationX, velocity:= WorkVelocityX);

// MC_MoveAbsolute, function block to move Y
FBMoveY( axis:=Y, execute:= MoveY,
         position:= PositionDestinationY, velocity:= WorkVelocityY);

```

Figura 12: Activación de relación maestro esclavo entre un eje virtual y dos reales.

A partir de los elementos básicos del modelo presentados en este artículo, se han definido modelos de representación para otros elementos tanto mecánicos, como eléctricos y de control, como por ejemplo, ejes rotativos, finales de carrera, sensores, campos de visión de cámaras, TCP de robots, representación de ECAM sobre el propio esquema, etc. Estas representaciones de sistemas más complejos no se han presentado en este artículo. Un sistema de representación combinado permitiría el intercambio de información entre diferentes perfiles formativos y profesionales sin tener que conocer las herramientas y normas gráficas de otros. El modelo ha permitido presentar de una forma sencilla y precisa, sistemas mecatrónicos en el ámbito docentes, tanto al alumnado con perfil formativo mecánico como de control y automatización.

La nueva propuesta está siendo empleada para la docencia de "sistemas de control ejes" permitiendo presentaciones simples y claras de sistemas mecatrónicos.

Referencias

- [1] ISO, "128:2003 Technical drawings, parts 1-2x".
- [2] ISO, "3952 Kinematic Diagrams – Graphical symbols, parts 1-4".
- [3] IEC, "61131-3:2013 Programmable controllers - Part 3: Programming languages".
- [4] ISO, "5455:1979 Technical drawings – Scales".
- [5] ISO, "6433:2012 Technical product documentation -- Part references".
- [6] UNIMOTION, "MTJ 65 LINEAR UNIT," p. <http://unimotion.eu/en/index/browseproductscategory/cid/587>.
- [7] F. G. a. W. G. Yongjun Bai, "Design of mechanical presses driven by multi-servomotor," *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011.
- [8] H. L. a. Y. Zhang, "Seven-bar mechanical press with hybrid-driven mechanism for deep drawing;," *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2010.
- [9] W. G. D. Z. T. H. Wenjie Tian, "A general approach for error modeling of machine tools," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 79, pp. 17-23, 2014.
- [10] J. Yang and Y. Altintas, "Generalized kinematics of five-axis serial machines with non-singular tool path generation," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, pp. 119-132, 2013.
- [11] W. Liping, X. Huayang, G. Liwen and Z. Yu, "A novel 3-PUU parallel mechanism and its kinematic issues," *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2016.
- [12] P. Xu, C.-F. Cheung, B. Li, L.-T. Ho and J.-F. Zhang, "Kinematics analysis of a hybrid manipulator for computer controlled," *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2016.
- [13] J. Zhang, Y. Zhao and Y. Jin, "Kinetostatic-model-based stiffness analysis of Exechon PKM," *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2016.
- [14] Y. Jiang, T.-m. Li and L.-p. Wang, "Dynamic modeling and redundant force optimization of a 2-DOF parallel kinematic machine with kinematic redundancy," *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2014.
- [15] PLC-Open, "<http://www.plcopen.org/index.html>".
- [16] PLC-Open, "TC-2 Motion Control," p. http://www.plcopen.org/pages/tc2_motion_control/index.htm.
- [17] ISO, "841:2001 Industrial automation systems and integration -- Numerical control of machines -- Coordinate system and motion nomenclature".
- [18] ISO, "369 Machine tools -- Symbols for indications appearing on machine tools," 2009.
- [19] ISO, "2203 Technical drawings -- Conventional representation of gears," 1973.
- [20] ISO, "1219 Fluid power systems and components -- Graphical symbols and circuit diagrams".
- [21] OMRON, "NJ/NX-series Motion Control Instructions Reference Manual (W508)," pp. 3-282.
- [22] "Manual PLC Lib: Tc2_MC2 TWINCAT 3," p. 74, 2016.
- [23] ABB, "Flying Shear http://www.baldormotion.com/includes/load_apps.asp?ID=AN00122".
- [24] SIEMENS, "SIMOTION SCOUT Configuration Manual," p. 37.
- [25] Z. W. & P. G. Maropolous, "Real-time error compensation of a three-axis machine tool," *Int J Adv Manuf Technol*, 2013.
- [26] R. Halicioglu, L. C. Dulger and A. T. Bozdana, "Modeling, design, and implementation of a servo press for metal-forming application," *Int J Adv Manuf Technol*, 2016.
- [27] J. E. T. & R. F. D. &, "Rapid prototyping of fuzzy controller pneumatic," *Int J Adv Manuf Technol*, 2007.
- [28] J.-S. Mo, Z.-C. Qiu, J.-Y. Wei and X.-M. Zhang, "Adaptive positioning control of an ultrasonic linear motor system," *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2016.
- [29] Z. T. W. C. Z. Y. B. H. C. Y. Li E., "type Synthesis and Analysis of Two-Axis Swaying Platform with Virtual Rotation Axis," *Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots II*, pp. pp 455-469, 2015.

Construcción y modelado de un prototipo *fan & plate* para prácticas de control automático

Cristina Lampón, Javier Martín, Ramon Costa-Castelló
 Departament d'Enginyeria de Sistemes, Automàtica i Informàtica Industrial (ESAI)
 Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB)
 Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
 cristina.lampon,javier.martin,ramon.costa@upc.edu

Muppaneni Lokesh Chowdary
 School of Mechanical Engineering, SASTRA UNIVERSITY

Resumen

En este trabajo se presenta una plataforma de prácticas de control automático robusto y de bajo coste. El trabajo describe los componentes y la arquitectura propuestos, además de presentar los modelos utilizados para describir su comportamiento. Finalmente se muestran algunos resultados experimentales.

Palabras clave: control automático, práctica de control, modelado, fan and plate.

1. INTRODUCCIÓN

Es bien conocido que los trabajos experimentales son uno de los pilares de la educación en el ámbito de la ingeniería y en particular de la ingeniería de control [1]. La realización de prácticas masivas en grupos grandes requiere disponer de numerosos equipos y que estos sean robustos al paso del tiempo y de los estudiantes. Por ello, habitualmente en la mayoría de centros y en particular en la ETSEIB se suelen utilizar equipos comerciales. Estos equipos presentan un coste elevado que en los últimos tiempos, de carestía económica, han sido difíciles de asumir. Por dicho motivo en el departamento de ESAI, y en particular en la sección de la ETSEIB, se han desarrollado diferentes proyectos para construir y adaptar plantas para la realización de prácticas de regulación automática [2, 3]. Uno de los trabajos realizados en los últimos tiempos ha sido el diseño, desarrollo y modelado de una planta tipo fan and plate [4, 5, 6]. Este tipo de planta es una de las plantas tradicionalmente utilizadas en cursos introductorios de control automático.

El sistema de ventilador y placa presenta, habitualmente, una entrada, que se utiliza para fijar la velocidad de giro del ventilador y una señal de medida que permite obtener el ángulo de la placa. El objetivo de control es fijar el ángulo de la placa a partir de la velocidad de giro del ventilador. Desde un punto de vista de ingeniería de control, esta planta presenta una característica no lineal pues el flujo de aire impacta sobre la placa de ma-



Figura 1: Fotografía del prototipo

nera diferente en función del ángulo. Otra de las características tradicionales de este tipo de planta es que el flujo de aire genera turbulencias que producen oscilaciones sobre la placa, estas turbulencias no son compensables y por tanto inducen limitaciones en el ancho de banda que se puede conseguir.

En este trabajo se aborda el proceso de construcción de un sistema *fan and plate* robusto y de bajo coste (sección 2), posteriormente se presenta el modelo no lineal y su procedimiento de ajuste paramétrico (sección 3), finalmente se obtiene un modelo linealizado, se diseña un controlador tipo PI [7, 8] y se valida experimentalmente su comportamiento (sección 4). Aunque el modelado se ha realizado principalmente con MATLAB/Simulink se ha implementado también un laboratorio virtual con EJSs [9], de cara a integrar la planta en un laboratorio virtual y remoto.

2. Descripción del prototipo

El prototipo diseñado (Figura 1) se compone de una estructura que hace las veces de soporte, un

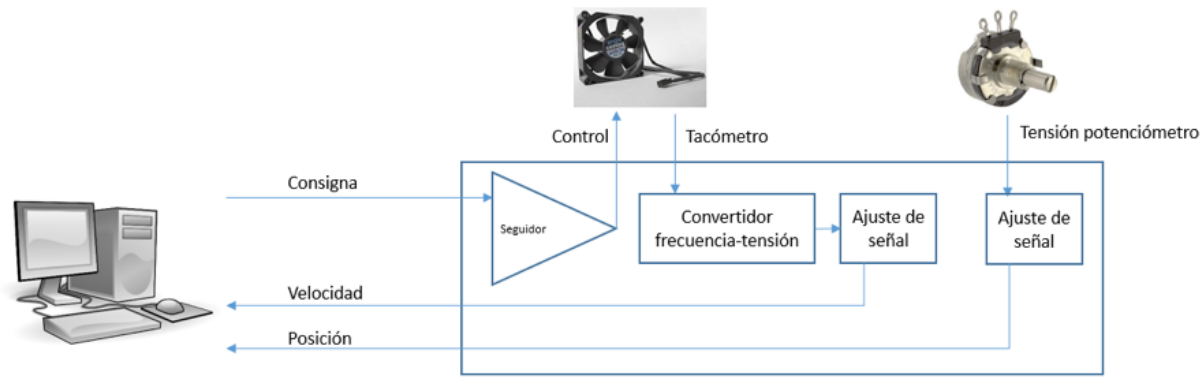


Figura 2: Esquema del sistema utilizado para la realización de las prácticas de control automático

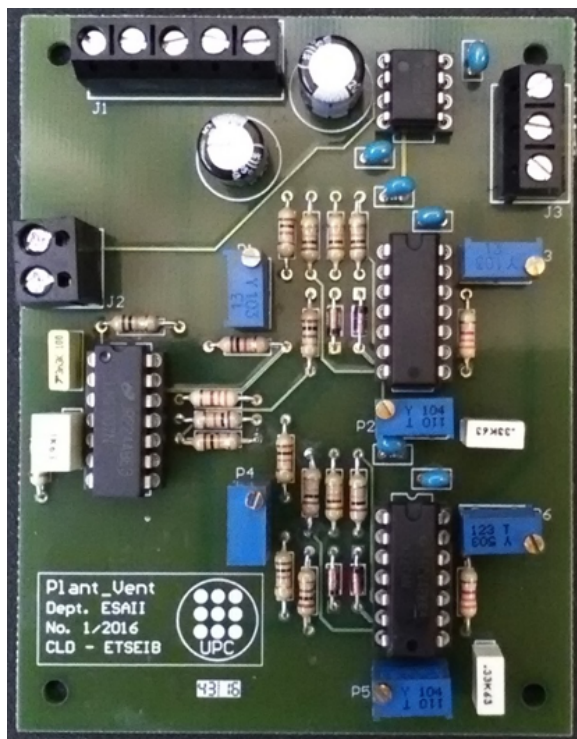


Figura 3: Imagen de la tarjeta electrónica desarrollada para el proyecto.

ventilador, una plancha de metacrilato, un potenciómetro y una caja, conectada a la red eléctrica, que alberga la alimentación del sistema y la electrónica que trata las señales de entrada y salida.

La planta se conecta a la tarjeta de adquisición de datos instalada en el PC mediante un conector SCSI del lado del PC y una regleta del lado de la caja de electrónica de la planta (Figura 2).

El ventilador está fijado a la tabla de la estructura de manera que queda encarado a la plancha y centrado con esta, a 26 cm de distancia. La plancha se conecta con el eje de giro mediante unos

enganches, también de metacrilato. Solidariamente al eje de giro se monta el potenciómetro que proporciona la posición de la plancha. Se ha seleccionado un potenciómetro de baja fricción para que el proceso de medida influya lo mínimo posible en la dinámica del sistema.

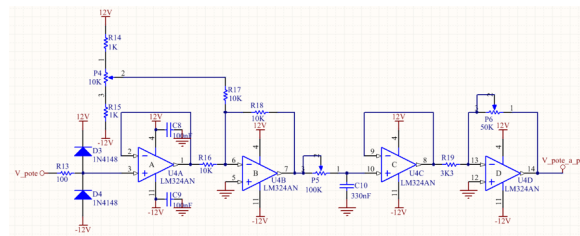


Figura 4: Adaptador de la señal del potenciómetro.

Las patas 1 y 3 del potenciómetro se conectan a 12 V y -12 V respectivamente, tensión proporcionada por la fuente de alimentación contenida en la caja de electrónica de la planta, bajo la tabla de madera. La pata 2 del potenciómetro, el cursor, se conecta a una placa electrónica (Figura 3) -diseñada específicamente para esta aplicación- para hacer pasar la señal por un ajuste de rango (Figura 1), cuya salida será la entrada en el PC (mediante la tarjeta ADDA) de la señal de posición del sistema.

Por robustez y simplicidad se ha seleccionado un ventilador industrial que incorpora la electrónica de potencia y una medida de velocidad angular. El ventilador consta de cuatro cables: tensión (rojo), masa (azul), PWM (violeta) y *tacho* (blanco). Si bien el cable de control recibe la etiqueta PWM por parte del fabricante, este modelo de ventilador permite el control tanto mediante modulación de ancho de pulso como mediante señal analógica de 0 a 5V, sin necesidad de configuraciones externas específicas. Por simplicidad, para esta planta se utiliza la señal analógica de control de 0 a 5V.

El ventilador necesita una alimentación de 24V, proporcionados por la fuente de alimentación contenida en la caja de electrónica de la planta. La consigna enviada desde el PC entra en la caja de electrónica para pasar por un circuito de seguidor (Figura 6). La salida de este circuito se conecta con la entrada PWM del ventilador.

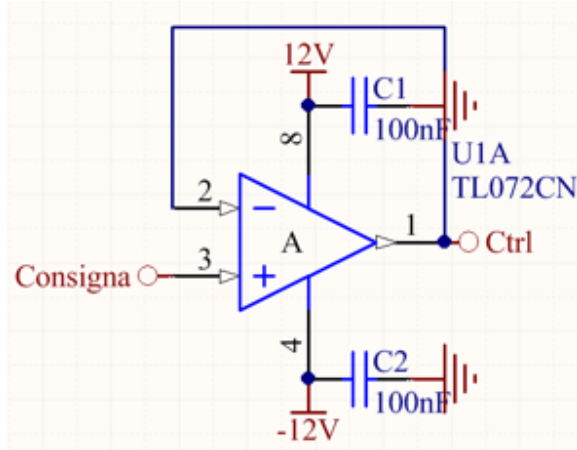


Figura 5: Entrada de consigna y salida de control del ventilador (seguidor de tensión).

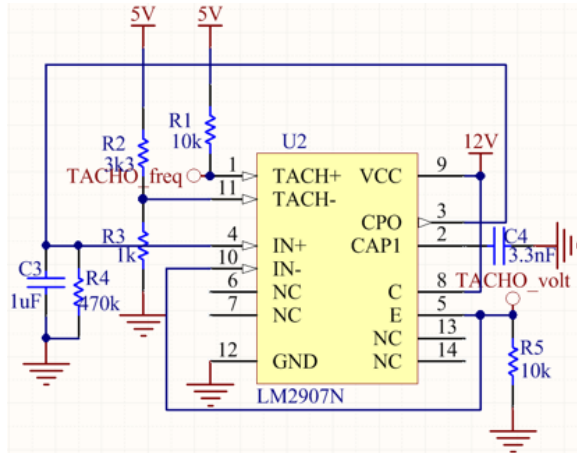


Figura 6: Convertidor frecuencia-tensión utilizado para obtener una medida analógica de la salida de velocidad del ventilador.

Aunque en este trabajo se utiliza un PC corriendo MATLAB/Simulink para realizar las entradas/salidas el sistema está pensado para utilizar hardware de bajo coste para cerrar el lazo de control [10, 11, 12, 13].

La tabla 1 muestra los componentes utilizados en la construcción del prototipo, su marca y su coste económico. Dado que todos los componentes son fáciles de encontrar y presentan características industriales es de esperar que el prototipo sea robusto y soporte bien el paso del tiempo y los estudiantes. Como se puede ver, el coste del prototi-

	Modelo	Marca	Importe
Fuente de alim.	LPQ202-M	Emerson	127.53€
Potenci.	P-2201-A502	Novotechnik	200.74€
Ventilador	4114 N/2H7P	ebmpapst	114.21€
Placa elec.			46.69€
Caja	1444-1593	Hammond	10.15€
Estructura			411.52€
Total			910.84€

Cuadro 1: Componentes y coste de los diferentes componentes del prototipo.

po supera ligeramente los 900 € cosa que lo hace muy competitivo en comparación con el precio de las plantas didácticas de características similares. Por ello, se adapta a las características planteadas inicialmente.

3. Modelado y ajuste

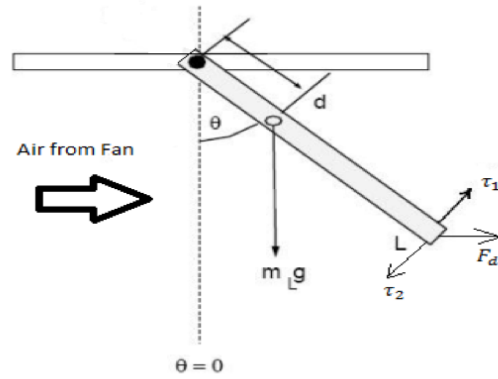


Figura 7: Fuerza aplicada por el flujo de aire sobre la placa.

La fuerza aplicada sobre la placa debido al aire se puede expresar como (Figura 7):

$$F_d = C_d \rho A \frac{v^2}{2} \cos(\theta) \quad (1)$$

donde C_d es el Coeficiente de fuerza de arrastre (1.28 para el aire), ρ es la densidad del medio ($1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ para el aire), A es la área de la placa ($0,3 \cdot 0,2 \text{ m}^2$ en el prototipo), θ es el ángulo de la placa respecto la vertical y v es la velocidad del aire en m/s. El par producido por esta fuerza sobre el eje de giro corresponde a:

$$\tau_1 = F_d \cdot L \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right).$$

El par producido por la gravedad en el cuerpo se opone al par de fuerza de arrastre, τ_1 , y, puesto que nuestro cuerpo se asume uniforme, el centro de la gravedad está exactamente en el centro por

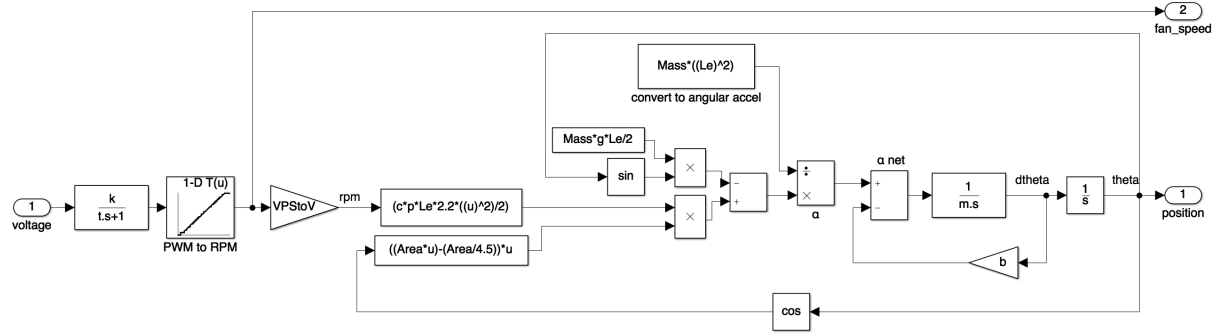


Figura 8: Codificación en MATLAB/Simulink del modelo desarrollado.

lo que:

$$\tau_2 = m \cdot g \cdot \frac{1}{2} \sin \theta$$

donde $m = 0,1614 \text{ kg}$ es la masa de la placa y $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ es la constante de gravitación.

El par que actúa sobre el eje de rotación, α corresponde a:

$$m \cdot r^2 \cdot \alpha = \tau_1 + \tau_2.$$

Posteriormente este par se utiliza como entrada a un sistema de primer orden que genera la velocidad angular que posteriormente es integrada para generar la posición angular. La Figura 8 muestra la codificación del modelo completo en MATLAB/Simulink.

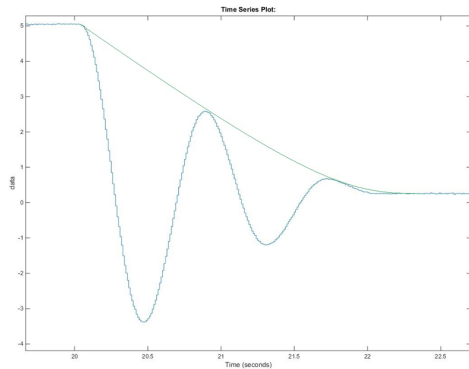


Figura 9: Experimento 1: Oscilación libre. Datos experimentales y envolvente ajustada.

Aunque muchos de los parámetros del modelo pueden obtenerse a partir de la descripción geométrica del sistema o de las propiedades físicas del aire y demás elementos, otros como la fricción son difíciles de conocer a priori. Por ello se han planteado algunos ensayos para calibrar el sistema. En particular, se ubica la placa en un ángulo determinado y se deja oscilar libremente. La Figura 9 muestra un primer experimento. Mediante este ensayo y utilizando la envolvente de la oscilación se puede

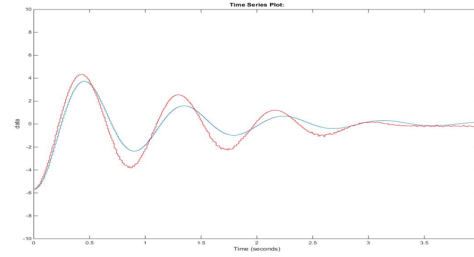


Figura 10: Experimento 2: Oscilación libre. Datos experimentales y salida del modelo.

ajustar un coeficiente de fricción $b = 0,5203 \text{ kg/s}$. La Figura 10 muestra un segundo ensayo y el ajuste que presenta el modelo con los parámetros fijados. Como se puede ver, este valor de b ajusta bastante bien el comportamiento para ángulos iniciales grandes. En la práctica, y dado que el sistema es no lineal y la fricción es un proceso complejo, el coeficiente de fricción ajustado depende de las condiciones iniciales del experimento (amplitud de las oscilaciones). En el resto del trabajo se ha tomado un valor medio que es $b = 0,321 \text{ kg/s}$.

Utilizando el modelo de MATLAB/Simulink (Figura 8) se puede ajustar una curva de comportamiento estacionario, esta se muestra en la figura 12.

La Figura 13 muestra la respuesta temporal de lazo abierto correspondiente al modelo obtenido y a la planta real. Como se puede observar la salida de ambos es muy parecida por lo que se puede concluir que el modelo ajusta la realidad. Puede observarse también que la posición angular del sistema no es exactamente constante, esta presenta oscilaciones alrededor del punto. Estas oscilaciones provienen de las turbulencias creadas por el aire al chocar contra la placa y son intrínsecas al sistema y no pueden ser compensadas. A efectos del controlador pueden modelarse como un ruido aditivo a la salida.

```

k = 1;
t = 1;
m = 0.1614;
b=0.321;

c=1.28;
p=1.2;
Le=0.3;
Br=0.2;
Area=(Le*Br);
Mass=0.1614;
g=9.81;
r = (Le/2);
RPMtoVPH=0.053;
HtoS=3600;
VPStoV=((RPMtoVPH)/(HtoS*Area));

```

Figura 11: Valor de los parámetros utilizados en el modelo.

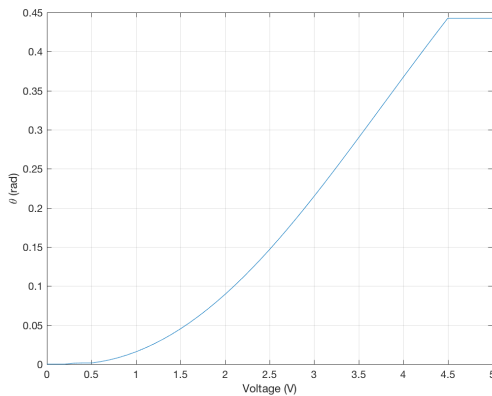


Figura 12: Curva de comportamiento estacionario obtenida del modelo MATLAB/Simulink (Figura 8).

Además del modelo MATLAB/Simulink se ha desarrollado un modelo utilizando EJSs, la Figura 14 muestra la vista de este modelo. Este tipo de modelo permitirá más adelante realizar prácticas virtuales y remotas con este dispositivo.

4. Diseño de sistema de control

Aunque el sistema planteado es claramente no lineal, es posible obtener un modelo linealizado alrededor de un punto de equilibrio. Para ello se elige un punto nominal situado en una inclinación de 10° , para este punto es necesario aplicar un voltaje de 2,7117 V. Utilizando MATLAB/Simulink o aplicando una expansión en serie de Taylor de la ecuaciones no lineales [7] es posible obtener el

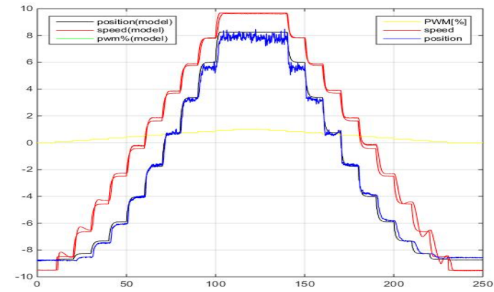


Figura 13: Comportamiento de lazo abierto del sistema. Comparación de la respuesta del modelo (Figura 8) y sistema real.

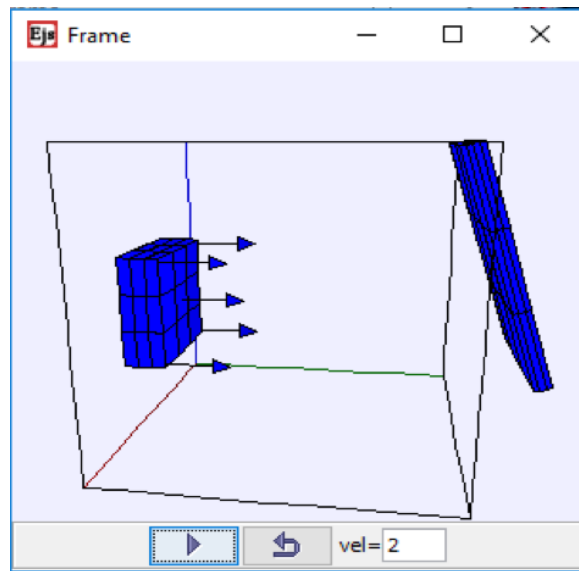


Figura 14: Vista del modelo del sistema desarrollada mediante EJSs.

siguiente modelo:

$$G(s) = \frac{\Delta\theta(s)}{\Delta u(s)} = \frac{14,45}{s^3 + 2,989s^2 + 108,9s + 106,9}.$$

A partir de este modelo se puede diseñar un controlador PI que regule la posición de salida. La figura 15 muestra el comportamiento de lazo cerrado para el modelo y el sistema experimental. Como se puede observar el comportamiento de ambos es bastante parecido cosa que valida el procedimiento desarrollado. Como se puede comprobar, pese a que el controlador se ha diseñado para un punto de equilibrio concreto el sistema de lazo cerrado funciona correctamente en un rango amplio de ángulos.

En asignaturas avanzadas la variación del modelo linealizado puede ser modelado mediante un modelo de incertidumbre no estructurada.

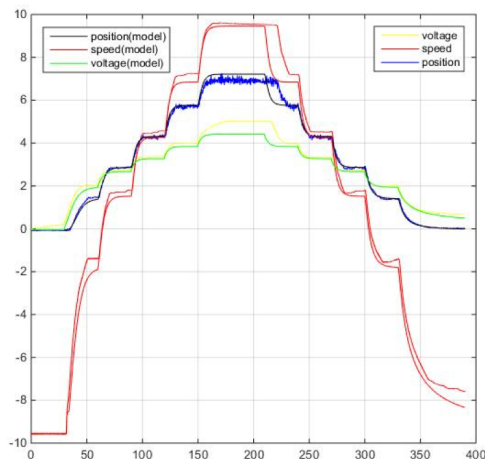


Figura 15: Comportamiento del sistema de lazo cerrado. Utilizando el modelo MATLAB/Simulink (Figura 8) y el sistema real.

5. Conclusiones

Se ha presentado un prototipo de planta didáctica tipo "fan and plate" de bajo coste y robusto. En la actualidad el departamento de ESII está construyendo varios elementos de este tipo con el objetivo de equipar el laboratorio docente.

Se ha ilustrado el procedimiento que habitualmente se sigue en unas prácticas introductorias de control automático. Estas plantas pueden utilizarse en asignaturas avanzadas que plantean técnicas como el control robusto o el control adaptativo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto DPI2015-69286-C3-2-R del Ministerio de Educación de España (MINECO/FEDER).

Referencias

- [1] S.Dormido Bencomo. Control learning: present and future. *Annual Reviews in Control*, 28(1):115 – 136, 2004.
- [2] Cristina Lampón, Ramon Costa-Castelló, and Sebastián Dormido. Hands on laboratory for classical nonlinear control systems : the dead-zone case. In IEEE, editor, *2016 IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, pages 816–820, Buenos Aires, Argentina, Sept 2016. IEEE. ISBN: 978-1-5090-0754-7.
- [3] Cristina Lampón, R. Costa-Castelló, and Sebastián Dormido. Módulo didáctico para la realización de experiencias de control no lineal. In *Actas de las XXXVII Jornadas de Automática*, pages 93–99, Madrid, septiembre 2016. CEA. ISBN: 978-84-617-4298-1.
- [4] Arjin Numsomran and Vittaya Tipsuwanporn. The design of robust pid control for fan and plate process. In *Proceedings of the Ninth IASTED International Conference on Control and Applications*, CA '07, pages 273–277, Anaheim, CA, USA, 2007. ACTA Press.
- [5] E. Dincel, Y. Yalçın, and S. Kurtulan. A new approach on angular position control of fan and plate system. In *2014 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, pages 545–550, Nov 2014.
- [6] María Macarena Sevilla, Iñaki Díaz David Bárcena, and Jorge Juan Gil. Control de un sistema no lineal con retraso ventilador-placa. In *Actas de las XXXVI Jornadas de Automática*, pages 1042–1049, Bilbao, septiembre 2015. CEA. ISBN 978-84-15914-12-9.
- [7] José Luis Guzmán Sánchez, Ramon Costa Castelló, Manuel Berenguel Soria, and Sebastián Dormido Bencomo. *Control automático con herramientas interactivas*. Pearson, 2012. ISBN: 9788483227503.
- [8] Ramon Costa Castelló and Enric Fossas. *Sistemas de Control en Temps Discret*. Edicions UPC, 2014. ISBN: 978-84-9880-492-8.
- [9] Félix J. García Clemente, Francisco Esquemebre, and Loo Kang Lawrence Wee. Deployment of physics simulation apps using easy javascript simulations. In *2017 IEEE Global Engineering Education Conference (EDU-CON)*, pages 1093–1096, April 2017.
- [10] Adolf Izquierdo Borràs and R. Costa-Castelló. Prácticas experimentales de control digital con elementos de bajo coste. In *Actas de las XXXVII Jornadas de Automática*, pages 402–409, Madrid, septiembre 2016. CEA. ISBN: 978-84-617-4298-1.
- [11] R. Barber, M. Horra, and J. Crespo. Practices using simulink with arduino as low cost hardware. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(17):250 – 255, 2013.
- [12] F.A. Candelas, G.J. García, S. Puente, J. Pomares, C.A. Jara, J. Pérez, D. Mira, and F. Torres. Experiences on using arduino for laboratory experiments of automatic control and robotics. *IFAC-PapersOnLine*, 48(29):105 – 110, 2015.
- [13] P. Reguera, D. García, M. Domínguez, M.A. Prada, and S. Alonso. A low-cost open source hardware in control education. case study: Arduino-feedback ms-150. *IFAC-PapersOnLine*, 48(29):117 – 122, 2015.

EDUCACION EN AUTOMATICA E INDUSTRIA 4.0 MEDIANTE LA APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS 3D

J. R. Llata, E.G. Sarabia, C. Torre-Ferrero, R. Sancibrian
Universidad de Cantabria (España)

llataj@unican.es, esther.gonzalezs@unican.es; torrec@unican.es; sancibrr@unican.es

Resumen

El presente trabajo se centra en la utilización de Tecnologías-3D, y más concretamente de sistemas de gestión de ciclo de vida del producto (sistemas PLM) de tipo industrial, como plataformas de enseñanza virtual colaborativa para la formación en Automática de estudiantes de las titulaciones universitarias de grado y/o máster con contenidos en automática y, especialmente, para las titulaciones relacionadas con la ingeniería industrial. Se muestra como los modernos sistemas PLM no solo permiten desarrollar competencias vinculadas al trabajo en grupo colaborativo y concurrente, si no que, además, permiten diseñar experiencias prácticas formativas vinculadas con los contenidos propios de las asignaturas de ingeniería de sistemas y automática, al tiempo que se está formando al alumno un entorno cada vez más empleado en ingeniería y que es pieza clave en la Industria del Futuro (IoF) o Industria 4.0 (I4.0).

Palabras Clave: Tecnologías-3D, Ingeniería de Sistemas y Automática, Industria del Futuro, Industria 4.0, Sistemas PLM.

1 INTRODUCCIÓN

Como es bien conocido, en el momento actual las industrias están sometidas a exigencias vinculadas a un mercado globalizado y esto afecta directamente a una mayor competencia en precio, a mayor exigencia en la calidad del producto, al desarrollo de nuevos productos ajustados a la demanda del cliente, a la globalización del diseño, la participación de numerosos suministradores deslocalizados, a la necesidad de ingeniería concurrente, etc.

Para hacer frente a todos estos requisitos las industrias necesitan aplicar un conjunto de nuevas tecnologías y es en este momento [14] [17] [18] [19] [23] cuando su implantación está dando lugar a una rápida y profunda transformación. Esta evolución, relacionada con la innovación en el campo de las tecnologías digitales y la inteligencia artificial, se

considera como la "cuarta revolución industrial" y se denomina indistintamente como "Industria 4.0" (I4.0) o como "Industria del Futuro" (IoF) en Europa.

La implantación de la IoF/I4.0 requiere la utilización combinada de un conjunto de tecnologías/técnicas entre las que cabe citar con especial relevancia las *Tecnologías-3D (T-3D)* y las técnicas y tecnologías vinculadas con el *Área de Conocimiento de Ingeniería de Sistemas y Automática (TT-ISA)*, así como las tecnologías relacionadas con las TICs, si bien el presente trabajo se centrará únicamente sobre las dos primeras.

Es importante resaltar el hecho de que hasta hace muy poco tiempo, las T-3D y las TT-ISA utilizaban entornos de diseño y simulación especializados muy diferentes, que hacían difícil la interacción entre profesionales y académicos de diferentes áreas de conocimiento y no facilitaban el trabajo colaborativo ni el desarrollo de ingeniería concurrente. De esta forma, era complejo obtener un diseño integrado del producto y su correspondiente proceso de fabricación y de servicio.

Sin embargo, en la actualidad, están surgiendo modernas herramientas software de gestión de ciclo de vida del producto (PLM) que permiten integrar ambas tecnologías sobre una misma plataforma.



Figura 1: Ejemplo de utilización de Tecnologías-3D para diseño de procesos de fabricación robotizados presentado en DELMIA®

Un claro ejemplo de esto son los modernos sistemas de gestión de ciclo de vida del producto (PLM). La figura 1 muestra un ejemplo de como las T-3D permiten diseñar procesos de fabricación robotizados, programando y verificando las programación de forma off-line.

Además, y atendiendo ahora a la formación universitaria, la utilización de plataformas PLM presenta, entre otras muchas, la ventaja de que, además de poder ser utilizadas para diseñar experiencias prácticas formativas vinculadas con los contenidos propios de las asignaturas de automática, en especial de aquellas relacionadas con los sistemas ciberfísicos, al utilizarlas se está formando al alumno en la utilización de un entorno colaborativo cada vez más empleado en ingeniería y que es pieza clave en lo que se denomina como Industria del Futuro (IoF) o Industria 4.0 (I4.0).

Siguiendo esta idea, este trabajo presenta dos casos de estudio en los que se muestra cómo las T-3D y las TT-ISA pueden ser utilizadas conjuntamente para proporcionar una mejor experiencia del aprendizaje de la Automática a los estudiantes, potenciando sus competencias digitales en las T-3D (entorno CAD / CAM / CAE / PLM), trabajo colaborativo e ingeniería concurrente, así como en las tecnologías y competencias relacionadas IoF/I4.0 [13] y, de esta forma, aumentando su perspectiva de empleabilidad e impulsando el interés futuro de los estudiantes sobre estos estudios.

1.1 INDUSTRIA DEL FUTURO

La IoF/I4.0 busca generar un modelo de fabricación con gran capacidad de adaptación y flexibilidad, con alta eficiencia, orientada al cliente y todo esto sin perder de vista la mejora en la ergonomía en los puestos de trabajo, la seguridad de las personas, el medio ambiente, etc.

Se puede decir que la IoF/I4.0 está basada en seis pilares básicos. Automatizada: Búsqueda de la mayor automatización posible en base a PLCs, Robot Industriales de diversos tipos y configuraciones que incorporan sensores que permiten interactuar de forma más inteligente con el entorno y con las diversas máquinas herramienta con las que trabajan de forma coordinada durante el proceso de fabricación. Flexible: Los sistemas de producción son capaces de adaptarse a nuevos productos, cantidades y plazos (JIT: Just-in-Time) según necesidades del cliente. Inteligente: Dotación de cierto nivel de inteligencia artificial en los diferentes recursos de fabricación (máquinas-herramienta, útiles, robots, elementos logísticos, etc.) de forma que sean capaces de tomar determinadas decisiones en función de las

condiciones cambiantes del entorno. Sostenible: Minimización de la contaminación, ahorro de energía y materiales. Conectada: Tanto los recursos como las personas están conectadas con los centros de producción, diseño y gestión, independientemente de la distancia a la que se encuentren. Colaborativa: Por un lado, utilización de plataformas colaborativas por parte de las personas para potenciar a colaboración al máximo nivel y entre todos los agentes involucrados en el ciclo de vida del producto y, por otro lado, espacios de colaboración entre personas y máquinas para el desarrollo de tareas conjuntas, manteniendo total seguridad para las personas, bienes y equipos.

La implantación de la IoF/I4.0 establece la posibilidad de utilización combinada de un conjunto de tecnologías que podemos englobar en las siguientes grandes áreas. Por un lado están las vinculadas con las tecnologías de la información y comunicación (TICs), tales como, Internet de las Cosas (IoT), Computación en la Nube (cloud Computing), BigData, Data-Mining, etc. Por otro lado, y con carácter disruptivo, están las TT-ISA, tales como la robótica industrial, robótica colaborativa, los sistemas de control avanzado, los útiles y utillajes inteligentes, la automatización completa (Full-Automation), los sistemas ciberfísicos, la mecatrónica, la inteligencia artificial y las técnicas de control inteligente, los sensores inteligentes, la puesta en marcha virtual (virtual commissioning), modelado y simulación de sistemas, la visión por computador, la incorporación de hardware en el lazo de control virtual (hardware in the loop), etc. Finalmente, y cara a la transformación digital de la empresa, las T-3D tienen enorme importancia, tanto durante todo el ciclo de vida de los nuevos productos de alto valor añadido e innovadores, como en el diseño del proceso de fabricación, máxime cuando en la actualidad para un mismo producto deben coordinarse y colaborar de forma conjunta y concurrente numerosas áreas de conocimiento de ingeniería, suministradores de componentes, equipos, materiales, maquinaria, utillajes, etc. Es obligado señalar en este punto que además de las tecnologías señaladas existen otras muy importantes (informática, nuevos materiales, nuevas fuentes de energía, química, etc.).

1.2 TECNOLOGÍAS-3D

Una parte importante de IoF/I4.0 recae sobre las T-3D, esto es las tecnologías que se ocupan de la ingeniería virtual, es decir, de la tecnología que utiliza computadores para la simulación física y geométrica de sistemas reales. Ver Figura 1. Hoy en día, estas T-3D son esenciales para el diseño de ingeniería, desarrollo de procesos y fabricación y algunos de sus componentes son los siguientes.

El software de diseño asistido por ordenador (CAD) surgió a principios de 1980 y permitió al diseñador crear modelos geométricos tridimensionales muy realistas de productos. Este software permite también asignar propiedades específicas, tales como el tipo de materiales, a las partes tridimensionales y, por lo tanto, establecer sus propiedades físicas. Estas propiedades físicas son utilizadas posteriormente por otras herramientas 3D en el proceso de simulación dinámica.

La Ingeniería Asistida por Ordenador (CAE) y la Fabricación Asistida por Ordenador (CAM) también forman parte de las T-3D. Aparecieron en la misma década, sin embargo, intentaron simular el comportamiento físico del producto y no sólo las características geométricas.

Por otra parte, es importante destacar que el trabajo colaborativo en diferentes campos de la ingeniería es esencial para el desarrollo de nuevos productos competitivos y de valor agregado. De hecho, hoy en día los equipos multidisciplinarios deben trabajar juntos para diseñar y crear nuevos productos y usualmente utilizan el software de ingeniería asistida por computadora (CAE) como una herramienta para lograr sus metas en el diseño. El software CAE es un elemento clave de diseño porque permite a los ingenieros simular y probar diseños en diferentes campos (mecánicos, termodinámicos, dinámica de fluidos, diseños eléctricos y electrónicos, sistemas de control, etc.). En los últimos 20 años las empresas que desarrollan el software CAE no consideraron la interacción entre los diferentes campos de ingeniería en sus productos. Esto significa que los ingenieros que trabajan en diferentes campos, pero quizás en el mismo producto, tuvieron problemas para interactuar entre ellos. Sin embargo, esta cuestión ha cambiado sustancialmente en la última década y las nuevas herramientas CAD están diseñadas para mejorar la interacción entre todos los miembros involucrados en el proceso de diseño y fabricación.

La gestión de datos de producto (PDM) surgió como la necesidad de proporcionar un acceso fácil y seguro a los datos creados durante el desarrollo del producto. El software de PDM utiliza bases de datos como repositorio para diferentes tipos de documentos que tienen como objetivo organizar, mantener y generar información disponible para todos los actores del diseño [4]. PDM se centró en el dominio de ingeniería, pero fracasó en otras actividades relacionadas con negocios tales como marketing, ventas, etc.

Los sistemas PLM (Product Lifecycle Management) surgieron a principios de los años 2000 y se propusieron como una herramienta para intercambiar información y trabajar juntos en el ciclo de vida

completo del producto [1] [25]. Los objetivos del PLM tratan de cubrir todas las etapas del desarrollo del producto integrando los procesos y las personas que participan en el proyecto [22]. Por lo tanto, el enfoque PLM intenta integrar todas las herramientas de software involucradas en el desarrollo del producto durante el ciclo de vida del producto. Toma en cuenta también la necesidad de una colaboración multidisciplinar, independientemente de la ubicación geográfica de las empresas y partes interesadas que participan en los proyectos [26] [27]. De hecho, la evaluación del producto o procesos a desarrollar requiere que los datos sean accesibles a cualquier persona en la cadena de valor, desde las etapas iniciales del diseño hasta el producto final o su retirada del mercado. Este procedimiento de ingeniería colaborativa permite a los ingenieros llevar a cabo tareas de superposición en paralelo, haciendo posible reducir el tiempo y el coste asociados a los diseños y mejorar la calidad de los productos [25]. Con el fin de abordar esta cuestión PLM permite la gestión de la innovación colaborativa y es una herramienta crucial para el desarrollo de productos competitivos en la industria moderna [24]. PLM también incorpora ingeniería virtual, pero va más allá del mero aspecto de ingeniería del desarrollo de productos. PLM trata de gestionar toda la información del producto en todas las etapas del ciclo de vida [6] [11]. Las principales ventajas que ofrece este enfoque son que ayuda a ofrecer productos y procesos más innovadores en un tiempo más corto. Esto significa que acorta el tiempo al mercado, que es un tema muy importante en un mundo global y competitivo. Además, establece una relación más amplia y colaborativa con todos los elementos de la cadena de valor, como clientes, proveedores y socios comerciales [12].

1.3 INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA

La ingeniería de sistemas [9] [15] [20] es una metodología interdisciplinaria que permite la realización de sistemas complejos. Se centra en definir las necesidades del cliente y la funcionalidad requerida a principios del ciclo de desarrollo, documentando los requisitos y procediendo con el proceso de síntesis del diseño. Continúa con la validación del sistema considerando la declaración completa del problema que abarca las operaciones, el rendimiento, la prueba, la fabricación, el costo y la programación, la capacitación y el soporte y la eliminación. Integra todas las disciplinas y especialmente grupos en el esfuerzo de equipo formando un proceso de desarrollo estructurado que procede desde el concepto hasta la producción y operación. Además, la ingeniería de sistemas considera las necesidades empresariales y técnicas de los clientes con el objetivo de proporcionar un

producto de calidad que satisfaga las necesidades del usuario.

Por otro lado, la disciplina de control automático tiene como objetivo facilitar y mejorar el desarrollo de diferentes actividades a las personas, colaborando con ellas o reemplazándolas en la toma de decisiones y la implementación. De manera formal el control automático es la disciplina que intenta reemplazar al operador humano en sus tareas físicas o mentales por artificios artificiales.

Este trabajo se presentan dos sencillos casos de estudio, vinculados al control automático de sistemas dinámicos, y se implementa en una plataforma colaborativa PLM de tipo industrial (Dassault Systemes 3D-Experience®).

1.4 ENTORNO DE APRENDIZAJE COLABORATIVO E INNOVACION EN LA ENSEÑANZA MEDIANTE T-3D

En el enfoque de aprendizaje tradicional la información es transmitida oralmente, con el apoyo de libros de texto específicos y el instructor es la principal fuente de conocimiento. Esta metodología de aprendizaje podría considerarse obsoleta porque la mayor parte de la información es, hoy en día, accesible para los estudiantes a través de internet y porque se demuestra que ha reducido el impacto en el aprendizaje efectivo [28]. Por estas razones es necesario cambiar las metodologías de aprendizaje, de forma que se enseñe a los alumnos a buscar, tratar y utilizar adecuadamente la información en ingeniería. En este escenario, el papel de los estudiantes no debe seguir siendo pasivo y tienen que tomar parte activa en el proceso de aprendizaje.

Un papel activo ofrece varias ventajas [21]. Por ejemplo, los estudiantes reconocen variaciones de conceptos previos cuando el contexto cambia, tienen que tomar decisiones basadas en conocimientos previos para resolver problemas de ingeniería afectados por incertidumbres, descubren nuevos canales tecnológicos para obtener información, desarrollan creatividad y capacidad de innovación, etc.

Entonces, es esencial utilizar una metodología de aprendizaje colaborativo para fomentar un papel activo de los estudiantes. Los enfoques de Aprendizaje Activo (AL) y Aprendizaje Basado en Proyectos (PBL) han sido establecidos como herramientas importantes para promover compromisos activos de los estudiantes y los instructores en el proceso de aprendizaje [2] [7] [8] [10]. Además, las herramientas colaborativas basadas en web han surgido como un mecanismo adecuado para hacer efectivo el trabajo de aprendizaje,

aumentando la colaboración entre estudiantes, instructores e incluso asociados externos [3].

Por lo tanto, para aplicar una metodología colaborativa es conveniente utilizar una plataforma educativa colaborativa. De esta manera es posible facilitar la comunicación entre estudiantes e instructores. Sin embargo, podría ser mucho más interesante usar una plataforma colaborativa PLM industrial para esta interacción. De hecho, las plataformas PLM están diseñadas para obtener y compartir el conocimiento completo sobre la evolución del diseño de ingeniería y el producto final. En otras palabras, utilizando plataformas educativas colaborativas, los estudiantes tienen acceso a la documentación del curso y pueden generar una cartera con las actividades desarrolladas durante el semestre. Los instructores tienen acceso a los resultados del trabajo de los estudiantes, siguiendo sus actividades, les hacen sugerencias y evalúan su trabajo. Sin embargo, las plataformas educativas sólo muestran el resultado del trabajo de los estudiantes, pero no el rendimiento y cómo se ha realizado este trabajo. Esto se debe a que no hay aplicaciones de ingeniería incorporadas en la estructura de la plataforma. Por lo tanto, CAD/CAE/CAM son herramientas externas que deben ser utilizadas por los estudiantes, pero su uso está fuera de control para los instructores. Por esta razón, los instructores necesitan información adicional para evaluar completamente el trabajo de los estudiantes [16], mientras que toda esta información ya está incluida en el PLM.

Así, cabe considerar a las nuevas plataformas PLM industriales como plataformas educativas colaborativas virtuales donde los estudiantes pueden aprender, compartir, e intercambiar toda la información sobre sus diseños (por ejemplo, pruebas, modelos, resultados, etc.) en las diferentes disciplinas de ingeniería. Bajo este escenario, las facultades de ingeniería tienen que cambiar su forma de trabajar con los estudiantes e introducir actividades de enseñanza colaborativa utilizando plataformas del tipo PLM. Esto significa que las disciplinas de ingeniería de enseñanza no pueden ser consideradas más aisladas y la interacción debe incluirse en los grados de ingeniería. Este hecho permite el uso de plataformas PLM colaborativas y fomenta la interacción entre los estudiantes que trabajan en diferentes disciplinas.

2 CASOS DE ESTUDIO

Los dos casos de estudio presentados a continuación han sido diseñados para exponer las posibilidades de aplicación de las T-3D en el desarrollo de sistemas de control básico para sistemas ciberfísicos (CPS).

En ambos casos se ha utilizado parte de la metodología V-cycle [9] [15] [20] [5], basada en las siguientes etapas: Establecimiento de requisitos esenciales para el cliente y para el funcionamiento del sistema. Definición funcional: Definición de la funcionalidad del sistema, es decir, lo que el sistema debe hacer antes de definir cómo hacerlo. Definición de la arquitectura lógica: Define la solución lógica para la definición funcional del sistema, es decir, define cómo realizar las funciones necesarias utilizando partes, interfaces, señales, equipos, algoritmos, etc. Diseño Físico: Es el mecanismo o la solución física para el sistema ciberfísico. Integración: Integró los comportamientos lógicos en real o digital. Verificación: Comprobación de las especificaciones de funcionamiento

En estos ejemplos, la plataforma PLM colaborativa industrial (Dassault Systèmes 3DEXperience®) [5] se utiliza para compartir toda la información y todas las etapas de diseño entre estudiantes e instructores. Esta plataforma incluye varios mecanismos para facilitar la comunicación entre estudiantes e instructores (aplicaciones de mensajería instantánea, lectores de páginas web, noticias, wikis, preguntas, cuadros de mando, etc.) como 3DSwYm®, las clásicas herramientas CAD/CAM/CAE para diseño de piezas, montaje, elaboración, diseño de mecanismos, simulación FEM, mecanizado, etc., así como herramientas para el diseño funcional y lógico, modelado de comportamiento dinámico, programación de robots, simulación de robots, etc.

2.1 SISTEMA BÁSICO DE CONTROL

Tal y como se puede ver en la figura 2, el primer caso de estudio es un sistema básico de control en el que se pretende realizar una sencilla regulación de la posición de un mecanismo muy simple. Este mecanismo presenta un único grado de libertad, correspondiente a una articulación de tipo rotacional, un accionamiento básico mediante un motor de corriente continua y un reductor acoplados al eje de la articulación, así como un sencillo sensor de posición que realimenta la posición angular del mecanismo.

Antes de comenzar con la realización del propio caso de estudio, el estudiante debe ser formado en el propio funcionamiento de una plataforma colaborativa tipo PLM. Para ello, debe conocer como es el acceso, cuales son los diferentes roles (por ejemplo, lector, contribuidor, autor, leader, propietario, administrador, etc.) y cuáles son los permisos a los que tiene acceso cada rol, los diferentes tipos de comunidades de colaboración y las herramientas básicas para la comunicación entre los miembros de la comunidad, los tipos de contenidos, etc. También es fundamental que

conozca la descripción conceptual de los que es el ciclo de vida de un producto y, en general, de todos los contenidos desarrollados dentro de la plataforma, y de los diferentes estados en los que puede estar un contenido (por ejemplo: privado, en desarrollo, congelado, disponible, obsoleto, etc.), así como el procedimiento para generar las diferentes versiones de cada producto. Con este conocimiento los alumnos acceden a la plataforma y, una vez asignadas las tareas a realizar por cada estudiante y establecidos los requisitos y la funcionalidad del sistema a desarrollar, ejecutan las diferentes aplicaciones necesarias. De esta forma, se trabajará en el diseño geométrico de los componentes, en la asignación de materiales a los mismos, en el posicionamiento geométrico de cada componente, en la incorporación de las articulaciones necesarias y la generación del mecanismo, la obtención de la cinemática y dinámica del conjunto mecánico, en el modelado dinámico y cinemático del sistema, incluyendo actuadores, reductores, sensores, etc., en el desarrollo del algoritmo de control dinámico y del control cinemático si se desea incorporar, etc., observado los resultados obtenidos y comparándolos con las especificaciones y requerimientos fijados inicialmente, etc. En la figura 2 se puede ver la estructura mecánica básica y la estructura lógica del sistema de control dinámico, así como un ejemplo de la simulación dinámica realizado en la plataforma colaborativa.

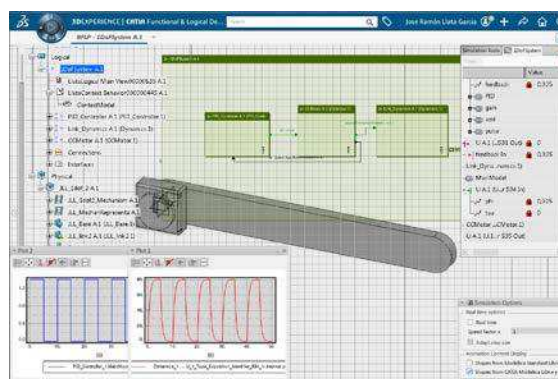


Figura 2: Ejemplo de utilización de T-3D en una aplicación básica de control de posición mediante la aplicación CATIA® Functional and Logical Design

2.2 DISEÑO BÁSICO DE ROBOT INDUSTRIAL

En este caso de estudio los estudiantes deber realizar el diseño básico de un robot industrial de seis grados de libertad en la plataforma PLM colaborativa industrial indicada previamente. Para ello, siguiendo la metodología del V-cycle, tomada del enfoque de ingeniería de sistemas, la etapa inicial es establecer el conjunto de requisitos para el sistema. En este caso, los requisitos están relacionados con la estructura

mecánica (grados de libertad, alcance, espacio de trabajo, arquitectura cinemática, etc.) y al comportamiento estático y dinámico (velocidades, aceleración, errores de posición en estado estacionario, etc.). Todos estos requisitos se incluyen en el sistema mediante el uso de la aplicación ENOVIA® Requirements [5], y se utilizarán durante los procesos de diseño y validación con el fin de comprobar la solución propuesta.

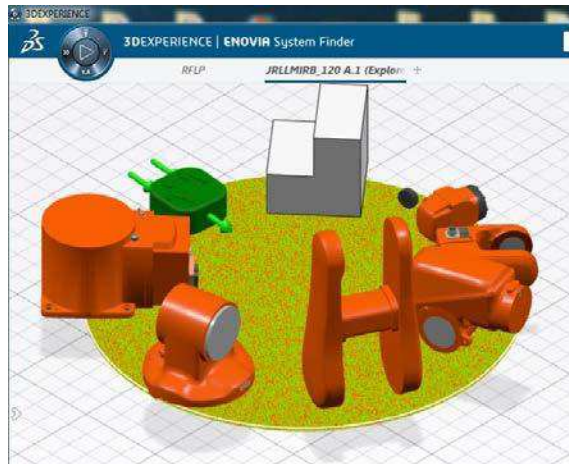


Figura 3: Diseño geométrico de los componentes mecánicos mediante CATIA® Part Design, y presentación en ENOVIA® system finder.

La segunda etapa es crear una descripción funcional del comportamiento deseado de todo el sistema. Esto se lleva a cabo con la aplicación CATIA® Functional and Logical Design [5]. En esta etapa se crean relaciones entre requerimientos y funciones. En la misma aplicación, se diseña una arquitectura lógica inicial para todos los sistemas.

La siguiente etapa es crear el sistema físico. En este caso, se han utilizado CATIA® Part Design para el diseño geométrico de los componentes mecánicos, CATIA® Assembly Design y CATIA® Mechanical Systems Design para el diseño del sistema físico mecánico [5]. Mediante el uso de estas aplicaciones es posible crear el modelo geométrico para todos los componentes y partes necesarios del sistema ciberfísico.

La figura 3 muestra la descripción geométrica de las piezas necesarias. Una vez que tengamos todas las piezas necesarias, es necesario ensamblar todos los componentes, incluyendo juntas, conexiones de ingeniería, señales de comando, materiales, etc. para obtener el mecanismo final. La figura 4 muestra el mecanismo final diseñado. Toda esta información física se utilizará en los siguientes pasos para obtener un modelo dinámico del mecanismo, no sin antes asignar las propiedades de los materiales en cada una de las piezas del sistema ciberfísico.

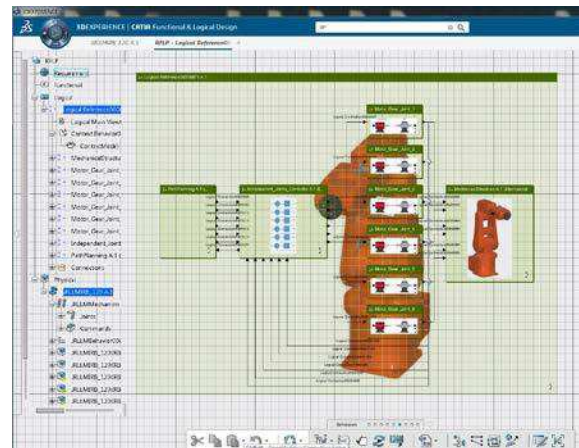


Figura 4: Diseño final del mecanismo y diseño lógico para el sistema de control, presentado en la aplicación CATIA® Functional and Logical Design.

En ese ejemplo no se ha incluido la descripción física de motores y reductores para simplificar la exposición.

Una vez que se ha diseñado una primera aproximación para el sistema físico, es posible profundizar en el diseño funcional y lógico. La figura 4 muestra el diseño lógico llevado a cabo para el robot industrial. En esta figura es posible observar la arquitectura de control diseñada con todas las conexiones lógicas, el bloque de control cinemático, el bloque de control dinámico, un bloque de actuador para cada junta y el bloque de mecanismo físico.

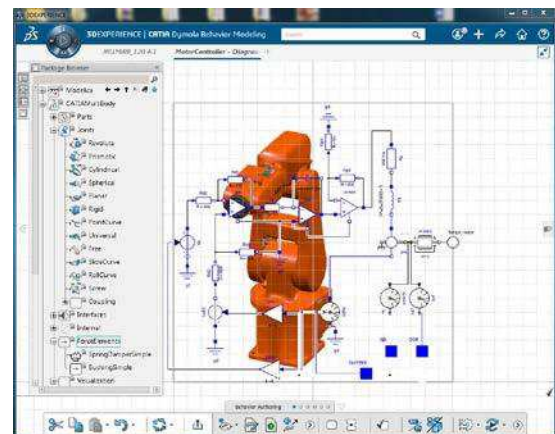


Figura 5: Modelización y diseño del sistema de control de una de las articulaciones, presentado en la aplicación CATIA® Behavior Modelling.

Una de las características más interesantes de la aplicación de T-3D a sistemas ciberfísicos es que a través de la definición geométrica tridimensional de los componentes mecánicos del sistema, de la asignación de material de cada componente, en base a la disposición geométrica establecida en el proceso de ensamblaje y en función de las conexiones de

ingeniería establecidas en las articulaciones, es posible obtener de forma automática las principales características de interés para la obtención del modelo dinámico, lo que facilita enormemente los procesos de ingeniería concurrente y de modificación de componentes. En la figura 5 es posible observar el diseño de un controlador electrónico interno para uno de los servomotores de corriente continua del robot.

Finalmente, cuando se ha diseñado todo el sistema, la etapa final de este ejemplo es simular el comportamiento dinámico y estático del robot para un conjunto de trayectorias deseadas y validar el rendimiento del equipo, de forma similar a como se puede ver en la figura 2, para el sistema de un único grado de libertad.

2.3 RESULTADOS

En los casos de estudio realizados y expuestos anteriormente, se muestra que es posible utilizar una plataforma PLM Industrial en lugar de una plataforma virtual colaborativa educativa para el diseño de sistemas ciberfísicos. También se ha observado que el estudiante es capaz de visualizar el proyecto de forma global, ya que puede observar los resultados obtenidos por las diferentes disciplinas de ingeniería utilizadas en el proceso de diseño (eléctricos, mecánicos, electrónicos, sistemas de control, etc.) aunque no pertenezcan a su especialidad. Por otro lado, los ejemplos muestran las ventajas de utilizar T-3D en aplicaciones de sistemas de control. Las T-3D expuestas aceleran el desarrollo y la comprensión de sistemas dinámicos complejos a través del modelado y la simulación. Proporcionan un entorno de grupo de trabajo integrado con representación digital compartida. También es posible llevar a cabo diseños de controladores dinámico basados en modelos. Es posible utilizar bibliotecas de dominio abierto para el modelado y la simulación rápidos para sistemas multi-físicos y de múltiples cuerpos. Permite desarrollar sistemas complejos que comprenden software de control integrado, mecánico, electrónico, hidráulico y neumático.

4 CONCLUSIONES

Hasta ahora, las T-3D y las TT-ISA pertenecían a entornos completamente diferentes y había dos comunidades académicas diferentes, con diferentes orígenes, trabajando casi separadamente una de la otra. Sin embargo, la IoF/I4.0 necesita profesionales que dominen las competencias de ambos entornos. Con este objetivo, el presente trabajo ha expuesto parte de las ventajas de utilizar la combinación de ambas tecnologías a la comunidad académica.

Así mismo, en este artículo se han explorado algunas de las posibilidades ofrecidas por las T-3D para resolver problemas relacionados la automática. Es importante resaltar que la aplicación combinada de T-3D y TT-ISA, no solo permiten dar al alumno de competencias para la industria moderna, sino que además abre grandes posibilidades desde el punto de vista formativo. Por ejemplo, para evaluar sobre modelos virtuales 3D diferentes estrategias de control para sistemas ciberfísicos, para la realización de laboratorios virtuales presenciales y/o remotos, para la obtención de gemelos virtuales de sistemas reales que pueden actuarse al tiempo, etc.

Por otro lado, este trabajo ha presentado algunas de las principales ventajas del uso de plataformas PLM industriales como plataformas colaborativas educacionales, observando que permite a los estudiantes observar y comprender todas las etapas de un proyecto industrial y colaborar en todas las disciplinas de ingeniería utilizadas en procesos de diseño (eléctrico, mecánico, electrónico, sistemas de control, etc.) y que, mediante el uso de plataformas PLM industriales, los estudiantes aprenden a utilizar las herramientas que necesitará en su vida profesional y, por lo tanto, están aumentando su perspectiva de empleabilidad.

Como conclusión final, cabe señalar el interés que puede tener para todos los grados relacionados con automática y con la ingeniería industrial, fomentar las actividades de innovación educativa centradas en la ingeniería de sistemas y las tecnologías digitales (en este documento sobre las Tecnologías-3D) con el fin de potenciar las competencias IoF/I4.0.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible con soporte económico de “La Fondation Dassault Systèmes”. Los autores agradecen a los miembros de 3DS Global Academy su inestimable apoyo.

Referencias

- [1] Ameri, F.; Dutta, D. (2005). “Product lifecycle management: closing the knowledge loops,” *Computer Aided Design & Applications*, vol. 2, no. 5, pp. 577-590.
- [2] Chao, C.Y.; Chen, Y.T.; Chuang, K.Y. (2015). “Exploring students’ learning attitude and achievement in flipped learning supported computer aided design curriculum: A study in high school engineering education,” *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 23, no.4, pp. 514-526.
- [3] Cheng, X.; Li, Y.; Sun, J.; Huang, J. (2016). “Application of a novel collaboration engineering method for learning design: A case

- study,” *British Journal of Educational Technology*, vol. 47, no. 4, pp.803-818.
- [4] Cheung, W.M.; Branall, D.G.; Maropoulos, P.G.; Gao, J.X.; Aziz, H. (2006). “Organizational knowledge encapsulation and re-use in collaborative product development,” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 29, no. 7, pp. 736-750.
- [5] Dassault Systemes Academy on-line courses and on-line learning materials.
- [6] Donati, T.; Bricogni, M.; Eynard, B. (2011). “PLM platform: integrated support of the enterprise digital chain for Collaborative Product Development,” 7th International Conference on Product Lifecycle Management, Bremen, Germany.
- [7] Esche, S.K. (2002). “Project-based learning (PBL) in a course on mechanism and machine dynamics,” *World Transactions on Engineering and Technology Education*, vol. 1, pp. 201-204.
- [8] Igartua, J.I.; Errasti, N. Ganzarain, J. (2014). “Assessing industry-based problem-based learning with engineering students: lessons learned,” 8th International Technology, education and Development Conference, pp. 6761-6771, Spain.
- [9] INCOSE Systems Engineering Handbook, (2006). “A guide for system life cycle processes and activities”, INCOESE-TP-2003-002-03.
- [10] Jaeger, A.; Mayrhofer, W.; Kuhlmann, P.; Matyas, K.; Sihn, W. (2013). “Total immersion: hands and headson training in a learning factory for comprehensive industrial engineering education,” *International Journal of Engineering Education*, vol. 29, no. 1, pp. 23-32.
- [11] Le-Duigon, J.; Bernard, A.; Perry, N. (2011). “Framework for PLM integration in SME networks,” *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 8, no. 4, pp. 531-544.
- [12] Maranzana, N. Segonds, F.; Lesage, F.; Nelson, J. (2012). “Collaborative design tools: A comparison between free software and PLM solutions in engineering education,” *IFIP International Conference on Product Lifecycle Management*, vol. 388, pp. 547-558.
- [13] Ministerio de Industria, Energía y Turismo del Gobierno de España (2015). “La transformación Digital de la Industria Española”.
- [14] Mosterman, P.J.; Zander, J. (2016). “Industry 4.0 as a cyber-physical system study,” *Software and Systems Modeling*, vol. 15, no. 1, pp.17-29.
- [15] NASA. (2007). *Systems Engineering Handbook*, NASA/SP-2007-6105.
- [16] Nguyen, V.; Dang, H.H.; Do, N-K.; Tran, D-T. (2016). “Enhancing team collaboration through integrating social interactions in a web-based development environment,” *Computer Applications in Engineering Education*, vol. 24, no. 4, pp. 529-545.
- [17] Oesterrich, T.D.; Teuteberg, F. (2016). “Understanding the implications of digitization and automation in the context of industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry,” *Computers in Industry*, vol. 83, pp. 121-139.
- [18] Prause, M.; Weigand, J. (2016). “Industry 4.0 and object-oriented development: Incremental and architectural change,” *Journal of Technology Management & Innovation*, vol. 11, no. 2, pp. 104-110.
- [19] Sackey, S.M.; Bester, A. (2016). “Industrial engineering curriculum in Industry 4.0 in a south African context” *South African Journal of Ind. Engineering*, vol. 27, no. 4, pp. 101-114.
- [20] Sage, A.P.; Rouse, W. B.; (1999). *Handbook of Systems Engineering and management*. Ed. John Wiley and Sons. ISBN 0-471-15405-9
- [21] Sancibrian, R.; Llata, J.R.; Sarabia, E.G.; Torre-Ferrero, C.; Blanco, J.M.; San-José, J.T. (2017). “Industry of the future: Implementation of collaborative CAE tools in industrial engineering degrees”, 11th International Technology, Education and Development Conference, Spain.
- [22] Schuh, G.; Rozenfeld, H.; Assmus, D.; Zancul, E. (2008). “Process oriented framework to support PLM next term implementation,” *Computer in Industry*, vol. 59, no.2, pp.210-218.
- [23] Shafiq, S.I.; Sanin, C.; Szczerbicki, E.; Toro, C. (2016). “Virtual engineering factory: Creating experience base for Industry 4.0,” *Cybernetic and Systems*, vol. 47, no. 1-2, pp. 32-47.
- [24] Stark, R.; Krause, F-L.; Kind, C.; Rothenburg, U.; Müller, P.; Hayka, H.; Stöckert, H. (2010). “Competing in engineering design. The role of virtual products creation,” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 3, pp. 175-184.
- [25] Thimm, G.; Lee, S.G.; Ma, Y-S. (2006). “Towards unified modelling of product lifecycles,” *Computers in Industry*, vol. 57, pp. 331-341.
- [26] Wright, T.; Madey, G. (2009). “A survey of technologies for building collaborative virtual environments,” *International Journal of Virtual Reality*, vol. 8, pp. 53-66.
- [27] Yu, G.D.; Yang, Y.; Zhao, X.; Li, G. (2014). “Multi-objective rescheduling model for product collaborative design considering disturbance,” *International Journal of Simulation Modelling*, vol.13, no. 4, pp. 472-484.
- [28] Zellner, N.E.B.; McCavit, M. (2016). “Persistence of physics and engineering students via peer mentoring, active learning, and intentional advising,” *European Journal of Physics*, vol. 37, no. 6, pp. 1-9

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL EN UNA PLANTA PILOTO HÍBRIDA

Maria P. Marcos, César de Prada & José Luis Pitarch

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid.

C/ Real de Burgos s/n, 47011, Valladolid, {maria.marcos | prada | jose.pitarch}@autom.uva.es

Resumen

En este trabajo se describe el desarrollo e implementación de un sistema de control de una planta piloto química. Dicha planta piloto tiene la característica de que el componente principal del proceso, la reacción exotérmica, está siendo simulado. Antes de configurar el sistema SCADA, se ha modelado y simulado el proceso, y definido el sistema de control que se llevará a cabo. Destacar que el sistema SCADA además de proporcionar una interfaz gráfica de visualización del sistema, conecta la tarjeta de adquisición de datos de la planta con diferentes módulos externos accesibles como servidores OPC con diferentes funcionalidades: cuatro capaces de realizar cálculos PID y que de forma conjunta constituyen el sistema de control, y uno que funciona como un bloque calculador.

Palabras clave: Planta híbrida, reacción simulada, EcosimPro, SCADA Intouch, S-IMC.

1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVO

En los últimos años se han desarrollado novedosas técnicas basadas en el modelado de procesos con el fin de mejorar la industria de procesos. Sin embargo, la validez de dichas técnicas debe ser corroborada experimentalmente en una planta real. No obstante, la experimentación es una técnica cara que además puede suponer complicaciones añadidas con respecto a la seguridad y al impacto ambiental, por ello se ha decidido llevar a cabo una opción intermedia, construyendo una planta piloto híbrida, es decir, una planta que mantiene su estructura e instrumentación y opera a tiempo real pero donde parte del proceso está siendo simulado.

Esta opción es una alternativa a los laboratorios virtuales [1] [2] los cuales están basados en simulaciones, puesto que, aunque la simulación es una técnica muy avanzada actualmente, la realidad de los procesos siempre presenta inconvenientes adicionales con los que lidiar. Esto se debe a que los modelos empleados en simulación son una aproximación más o menos precisa de la realidad y, por tanto, los resultados derivados de las simulaciones pueden diferir bastante de la realidad experimental.

El interés de proponer una planta piloto híbrida es que se pueda experimentar con ella sin incurrir en los costosos gastos de instrumentación para la medida de concentración de compuestos químicos, adquisición de materias primas, la problemática del tratamiento de residuos, etc., es decir, se obtiene una solución más favorable económica y ecológicamente. Aunque esta forma de operar tampoco reproduce totalmente el comportamiento real del sistema, sí que puede aproximar de una manera muy fiel la realidad además de permitir la experimentación en un rango de operación más amplio.

Un caso conocido es la aplicación de plantas piloto híbridas por la universidad de Santamaría de Valparaíso, Chile en el campo de las columnas de flotación [3]. En la minería, las columnas de flotación son uno de los equipos más utilizados para obtención de minerales valiosos procedentes de la ganga, pero realizar experimentos con estos equipos es costoso debido a sus condiciones de operación. La implementación del sistema híbrido viene dado por la sustitución de la alimentación por agua y la consiguiente simulación de concentraciones de los componentes tanto a la entrada como a la salida.

La finalidad de la planta piloto es que tanto los alumnos como los investigadores de la Universidad de Valladolid puedan experimentar diversas estrategias de control y optimización, modificando la dificultad de las reacciones a simular.

Así pues, este trabajo tiene como objeto configurar el sistema de control y supervisión de una planta piloto química, en la que el componente principal del proceso, es decir, la reacción exotérmica, va a ser simulada con el fin de que se pueda experimentar con ella, actuar sobre el control de las diferentes variables del proceso y observar su dinámica. Para llevar a cabo esta configuración primero se ha modelar el proceso y diseñar y simular el sistema de control que se va implementar.

El resto del trabajo se organiza como sigue. La siguiente sección describe la planta piloto, los diferentes equipos y la instrumentación que la forman, y se comentan las consideraciones que se han de tener en cuenta al realizar un montaje híbrido. En la Sección 3

se muestra el modelo obtenido del proceso y la simulación de dicho modelo para las condiciones del montaje experimental. La Sección 4 se divide en el diseño del sistema de control según los resultados de la sección anterior, y la implementación de dicho sistema mediante un SCADA (“Supervisory Control And Data Acquisition”, supervisión, control y adquisición de datos). Por último, la Sección 5 expone las conclusiones generales a las que se ha llegado junto con las líneas futuras.

2 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

El elemento principal de la planta piloto es un reactor continuo de tanque agitado (RCTA) con una camisa refrigerante etiquetado como R-101 en la Figura 1, en el que se quiere llevar a cabo la simulación de la reacción un mol de reactivo A para obtener un mol de producto B.

Una reacción química conlleva altos costes de materia prima, tratamiento de productos, problemas de seguridad e impacto ambiental, etc., por ello se ha decidido que la parte experimental de la reacción sea sustituida por un cálculo en simulación cuyos resultados puedan visualizarse en forma de concentración y aplicar el calor de reacción que se estaría produciendo mediante una resistencia eléctrica variable, cuya potencia corresponda a la cantidad de calor de reacción calculado. Así pues, para simular dicho calor, parte del fluido del interior del reactor se lleva a un tanque (T-102) en el que hay una resistencia calefactora que aumenta la temperatura del fluido, devolviéndose nuevamente al reactor.

Para poder simplificar el comportamiento real del sistema se tienen que tener en cuenta un par de consideraciones:

En primer lugar, para que la hidrodinámica del proceso quede bien representada, las propiedades físicas de los diferentes fluidos del proceso real (densidad, viscosidad, capacidad calorífica, etc. de cada corriente) han de ser prácticamente invariantes con las propiedades que si varían a lo largo del proceso (temperatura y concentración) y así poder sustituir los reactivos y productos por un fluido más manejable, en este caso el agua.

En segundo lugar, puesto que parte del proceso se está simulando, es necesario disponer de modelos matemáticos que permitan calcular de forma precisa las variables que no se pueden medir (debido a que la reacción se está simulando) según las condiciones de operación establecidas.

Consecuentemente, si se dispone de un modelo y la planta piloto puede ser operada utilizando estos fluidos alternativos, se puede desarrollar un sistema híbrido con el que poder experimentar parcialmente. El comportamiento real queda simplificado, pero las características hidrodinámicas y térmicas se mantienen fieles a la realidad. Además, empleando un modelo adecuado, las concentraciones finales del proceso pueden ser calculadas razonablemente (no medidas) en un amplio rango de operación.

Además del reactor y del tanque calefactor, la planta cuenta con diversos equipos auxiliares; tanque de almacenamiento de reactivos (T-101), bomba peristáltica de impulsión de reactivos al reactor (P-101), bomba de diafragma a la salida del reactor (P-102), bomba peristáltica de diafragma a la salida del reactor (P-103A) e introducir (P-103B) el líquido que se lleva al tanque calefactor, válvula de diafragma que controla el fluido refrigerante (V-101), y unidad de potencia trifásica a tiristores que proporciona la potencia a la resistencia calefactora (J-101).

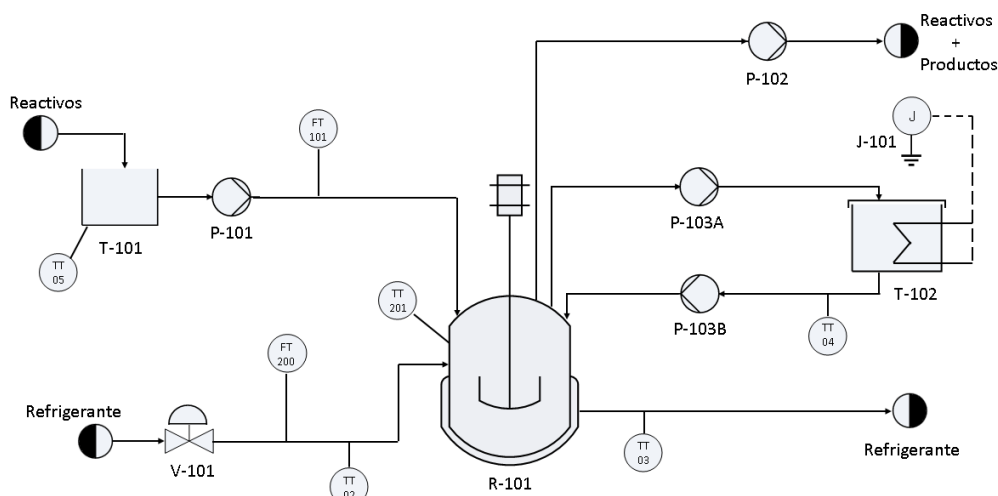


Figura 1 Diagrama del proceso

Como instrumentación para poder implementar el sistema de control se cuenta con: dos caudalímetros electromagnéticos para medir los caudales de alimento al reactor (FT101) y a la camisa refrigerante (FT200) y 5 termorresistencias con su correspondiente transmisor para medir la temperatura en: el tanque de alimentación (TT05), dentro del reactor (TT201), a la entrada (TT02) y salida (TT03) de la camisa y en el tanque calefactor (TT04), todo ello conectado a una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) para poder controlar el sistema mediante el ordenador.

3 MODELADO Y SIMULACIÓN

En primer lugar, se ha desarrollado un modelo matemático del sistema que refleja con precisión las características más importantes del mismo, con el objetivo de simular posteriormente el comportamiento y diseñar el sistema de control.

Para llevar a cabo este modelado se han aplicado los principios de conservación de masa y energía y otras leyes particulares del dominio de aplicación. Además, se ha considerado que en el interior hay un comportamiento de mezcla perfecta, es decir se ha descartado que haya caminos de flujo preferentes o zonas muertas, y se ha considerado que el caudal de entrada es el mismo que el de salida, tanto en el caso del reactor como en la camisa refrigerante.

El modelo obtenido es:

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{Q_v}{V}(C_{A0} - C_A) - r_A \quad (1)$$

$$V\rho C_p \frac{dT}{dt} = Q_v(T_i - T) - Q_{int} + Q_{reac} \quad (2)$$

$$V_j\rho_j C_{pj} \frac{dT_j}{dt} = Q_{vj}(T_{ji} - T_j) + Q_{int} \quad (3)$$

$$Q_{reac} = \Delta H V r_A \quad (4)$$

$$Q_{int} = UA(T - T_j) \quad (5)$$

$$r_A = K_0 e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)} C_A \quad (6)$$

$$X = 1 - \frac{C_A}{C_{A0}} \quad (7)$$

Donde:

- A : es el área de intercambio de calor entre el reactor y la camisa, en m^2 . ($0.1485m^2$)
- C_A : es la concentración del compuesto A en el reactor, en mol/L.

- C_{A0} : es la concentración del compuesto A inicial, en mol/L. (5 mol/L).
- C_p : calor específico del fluido, en $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$. ($4.18 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$).
- C_{pj} : calor específico del refrigerante, en $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$. ($4.18 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$).
- E_a : es la energía de activación de la reacción, en J/mol . (2420 J/mol)
- ΔH : variación de entalpía de reacción molar, en kJ/mol (20 kJ/mol).
- K_0 : es el factor preexponencial o factor de frecuencia, en min^{-1} (1.38 min^{-1})
- Q_{int} : es el calor intercambiado entre el reactor y la camisa refrigerante, en kJ/min .
- Q_{reac} : es el calor de reacción simulado mediante el amplificador de potencia, en kJ/min .
- Q_v : es el caudal de reactivos, en L/min .
- Q_{vj} : es el caudal de refrigerante, en L/min .
- R : es la constante universal de los gases ideales, en $\text{J/mol}\cdot\text{K}$. ($8.31 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$)
- r_A : es la velocidad de reacción, en $\text{mol/L}\cdot\text{min}$.
- T : es la temperatura a la salida del reactor, en $^{\circ}\text{C}$.
- T_i : es la temperatura a la entrada del reactor, en $^{\circ}\text{C}$. (15°C)
- T_j : es la temperatura de la camisa refrigerante a la salida, en $^{\circ}\text{C}$.
- T_{ji} : es la temperatura de la camisa refrigerante a la entrada, en $^{\circ}\text{C}$. (10°C)
- U : es el coeficiente global de transmisión de calor, en $\text{kJ/min}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}$ ($202,64 \text{ kJ/min}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}$).
- V : es el volumen del reactor, en L . (4.67 L)
- V_j : es el volumen de la camisa, en L . (1 L)
- X : es la conversión de la reacción (s/u).
- ρ : densidad del fluido, en kg/L . (1 kg/L)
- ρ_j : densidad del refrigerante, en kg/L . (1 kg/L)

De las diferentes variables que describen el proceso, algunas de ellas son constantes que dependen bien del montaje experimental o de la reacción a simular, y otras son variables de estado del proceso. Por tanto, se puede simular el comportamiento del sistema para un montaje experimental concreto y una reacción determinada.

Para el montaje experimental llevado a cabo se ha realizado una simulación del proceso mediante el entorno de simulación EcosimPro [4] modificando los caudales de alimentación al reactor y de refrigerante. El resultado de dicha simulación puede observarse en la Figura 2.

Los valores de los parámetros que se han utilizado para la simulación (entre paréntesis en la descripción de las abreviaturas) corresponden a los datos del montaje y las temperaturas de entrada a las de la toma de agua de red en Valladolid en marzo.

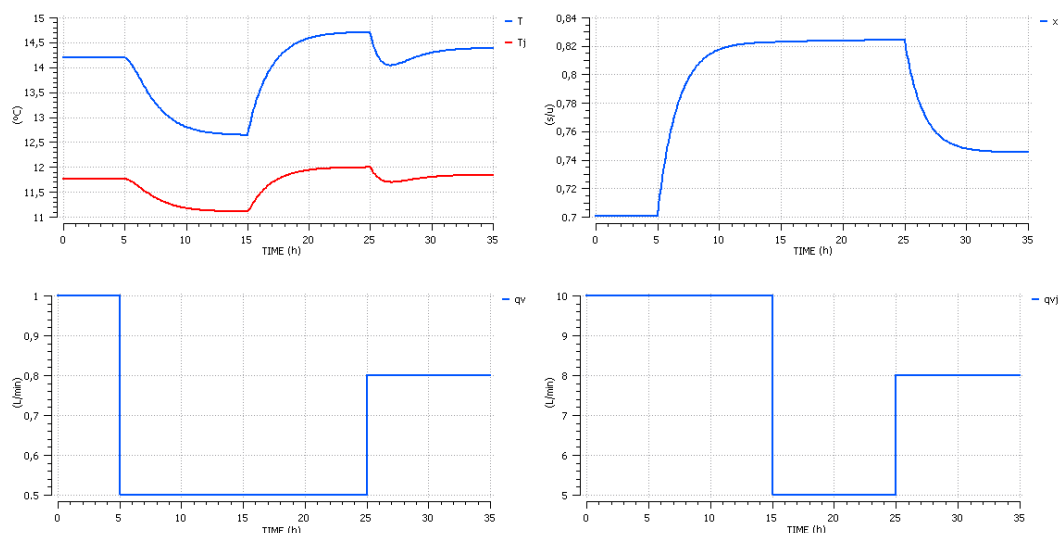


Figura 2. Respuesta dinámica del sistema a) Temperaturas b) Conversión
c) Caudal de refrigerante d) Caudal de alimentación

Partiendo del estado estacionario, se han introducido saltos en el caudal de alimentación a los 5 y 25 minutos (Figura 2.d) y en el caudal de refrigerante a los 15 y 25 minutos (Figura 2.c). Si se analiza la evolución del sistema hasta el equilibrio para las variables más importantes del sistema (conversión y temperatura) se observa que la conversión únicamente se ve afectada positivamente ante una disminución del caudal de alimentación (Figura 2.b), mientras que la temperatura tanto del reactor como de la camisa depende de ambos caudales, pero con dinámicas opuestas: una disminución del caudal de alimentación disminuye las temperaturas (ganancia positiva) mientras que una disminución del caudal de refrigerante las aumenta (ganancia negativa).

Cabe destacar que la ganancia de la temperatura respecto al caudal de alimentación es mayor que la ganancia respecto al caudal de refrigerantes puesto que, como se aprecia en la Figura 2.a, ante un cambio de ambos caudales, las temperaturas se ven más afectadas por el cambio del caudal de alimentación, pese a ser un cambio en menor proporción.

4 SISTEMA DE CONTROL

Existen diferentes estrategias de control que se puede realizar para un mismo proceso según las necesidades que se requieran. En este caso solo se van a establecer dos lazos simples de control, uno para controlar la conversión y otro para controlar la temperatura del reactor. En las siguientes subsecciones se explicará respectivamente, como se ha realizado el diseño de estos controladores y como se ha conectado el sistema de control a la planta real mediante un sistema HMI.

4.1 DISEÑO DEL CONTROLADOR

En una reacción las dos variables más importantes a controlar son la temperatura que se alcanza en el interior del reactor, sobre todo cuando dicha reacción es exotérmica, y la concentración de producto o conversión de la reacción. Para llevar a cabo este control, las variables manipuladas son el caudal de alimentación al reactor, y el caudal de refrigerante.

A partir del modelo obtenido se han realizado diferentes simulaciones manipulando las entradas del sistema (los diferentes caudales) con el fin de obtener la matriz de ganancias relativas (RGA) y así saber la relación entre las variables manipuladas y las controladas, y poder realizar la sintonía teórica de los controladores PID que controlen el sistema.

Mediante los datos de simulación de los incrementos de las salidas respecto a los saltos introducidos en las entradas se puede calcular una aproximación las ganancias estacionarias de cada par y por tanto la matriz de ganancias estacionarias:

$$\begin{bmatrix} T \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0842 & 0.0651 \\ -1.81 \cdot 10^{-3} & -0.246 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{vj} \\ Q_v \end{bmatrix} \quad (8)$$

Una vez obtenida dicha matriz, para obtener la RGA se han de calcular las diferentes ganancias relativas del sistema [5], donde la ganancia relativa de cada par entrada – salida se calcula a partir de las ganancias estacionarias en los casos extremos de cada lazo, es decir, cuando el resto de lazos del sistema están abiertos y cuando el resto de lazos del sistema están con control perfecto. Sin embargo, puesto que puede demostrarse [5] que, para un sistema de dos entradas con dos salidas, la ganancia estacionaria cuando el resto de lazos

del sistema están controlados depende del resto de ganancias cuando el resto de lazos están abiertos, a partir de los resultados de la matriz de ganancias estacionarias (8), la matriz de ganancias relativas queda tal que:

$$RGA: \begin{matrix} & x & T \\ Q_v & \begin{bmatrix} 0.98 & 0.02 \\ 0.02 & 0.98 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (9)$$

A la vista de los resultados obtenidos, se establecen dos lazos de control con el siguiente emparejamiento: el lazo 1 que controlará la conversión a partir del caudal de alimentación (Figura 3) y el lazo 2 que controlará la temperatura del reactor a partir del caudal de refrigerante (Figura 4). Además, puesto que los valores de la diagonal son aproximadamente 1 se puede deducir que la interacción entre ambos lazos de control será prácticamente nula.

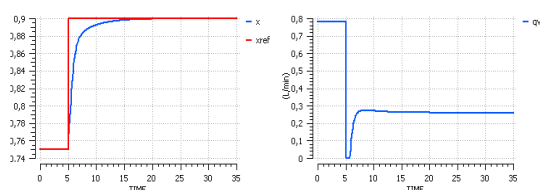


Figura 3. a) SP y PV - Conversión del reactor
b) CV - Caudal de alimentación

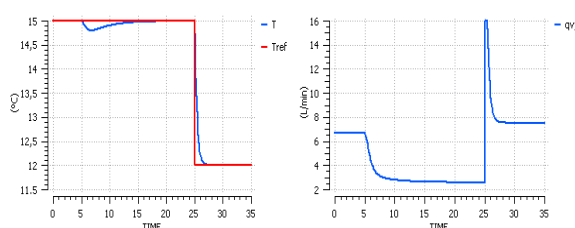


Figura 4. a) SP y PV - Temperatura del reactor
b) CV - Caudal de refrigerante

Se ha de señalar que para realizar la sintonía de los controladores se ha utilizado el método de S-IMC [6]

en lazo abierto, tomando λ igual a 2, para tener un control ni demasiado conservador ni demasiado agresivo.

A partir de la Figura 3 y la Figura 4 se puede apreciar que al modificar los estados de referencia, el sistema responde rápidamente para llegar al nuevo punto de consigna. También cabe destacar que, tal y como se esperaba, hay poco acoplamiento entre lazos pues la temperatura apenas varía ante un cambio de caudal de alimentación y la conversión no varía ante cambios en el caudal de refrigerante.

4.2 IMPLEMENTACIÓN

Una vez diseñado el sistema de control de la planta, se procede a implementarlo, teniendo en cuenta que el caudal de alimentación se controlará con la velocidad proporcionada a la bomba de alimentación (P-101) y el caudal de refrigerante se regulará mediante la válvula V-101. Como no se manipulan directamente los caudales pero sí son medidos, el sistema de control será parecido al obtenido teóricamente pero añadiendo en ambos casos un lazo interno con el que controlar los correspondientes actuadores, es decir, la bomba P-101 y la válvula V-101. Así pues, se establecerán dos lazos en cascada, en el primero el lazo externo controlará la conversión a partir del caudal de alimentación de referencia y el lazo interno comparará dicho caudal de referencia con el caudal real y modificará la velocidad de la bomba. Por otra parte, el segundo lazo en cascada hará lo mismo con la temperatura, el caudal de refrigerante y la válvula respectivamente (Véase Figura 5).

Actualmente mediante el software Intouch de la empresa Wonderware [7] se ha diseñado un sistema SCADA que, por un lado conecta la planta (mediante la tarjeta DAQ) con el sistema de control, y por otro proporciona una interfaz gráfica con la que supervisar y controlar la planta. (Véase Figura 6)

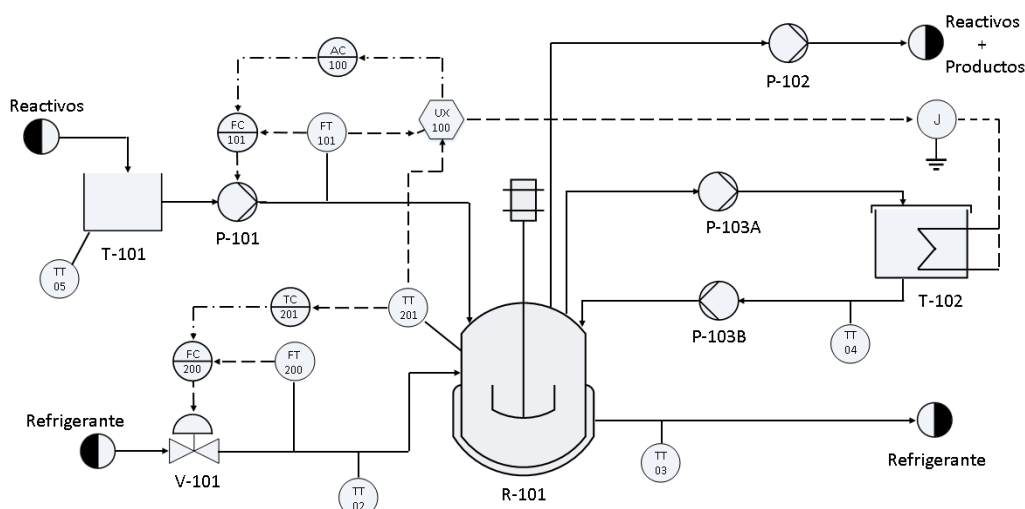


Figura 5 . Diagrama P&I del proceso

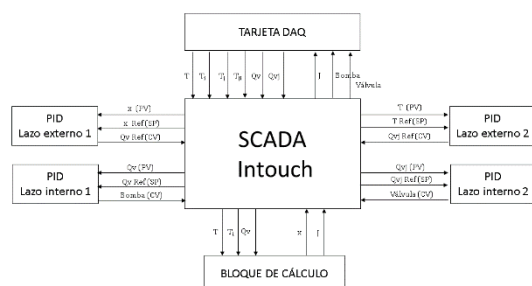


Figura 6. Integración de los diferentes subsistemas

Mediante la tarjeta DAQ se obtienen los valores medidos de las temperaturas tanto del reactor, a la entrada y la salida de la camisa refrigerante, y del tanque de almacenamiento de reactivos, como de los caudales de alimentación y de refrigerante, además de enviar las señales de control a la bomba de alimentación y a la válvula de refrigerante, y la señal correspondiente a la unidad de potencia para que suministre el calor de reacción adecuado.

Por otra parte, el sistema de control se ha implementado utilizando 4 módulos externos accesibles como servidores OPC. Cada uno de estos módulos, desarrollado mediante EcosimPro, actúa como un controlador PID que, tras suministrarle el valor en tiempo real de la variable del proceso que se quiere controlar, el punto de consigna y los parámetros del regulador, calcula la correspondiente variable manipulada [8].

Cabe destacar que para que la planta reproduzca el comportamiento real del sistema, se ha tenido que desarrollar un quinto módulo externo que calcula la conversión y el calor de reacción que se estaría produciendo (y que ha de suministrar la unidad de potencia J-101 para simularlo) a partir de las variables medidas. Es decir mediante EcosimPro, se ha desarrollado un nuevo servidor OPC que actúa como bloque calculador, y en tiempo real, recibe el valor del caudal de alimento que se está midiendo y de la temperatura del reactor, resuelve las ecuaciones (1), (4), (6) y (7), y devuelve cómo salida la conversión y el calor de reacción. A partir del valor de calor de reacción que devuelve el bloque calculador, el sistema SCADA envía la señal correspondiente a la unidad de potencia para suministrar dicho calor a la resistencia calefactora. En el diagrama P&I de la Figura 5 se ha representado este bloque calculador con símbolo de ordenador identificado como UX100.

Por último, la Figura 7 muestra la pantalla principal de la interfaz gráfica del sistema SCADA que se ha diseñado, en la que se observan los valores en tiempo real de las diferentes variables del proceso. Además, esta pantalla permite encender y apagar la planta, establecer la forma de controlar los diversos lazos de control: forma manual (se ha de establecer el valor deseado de consigna) o automáticamente (se indica directamente la señal de control).

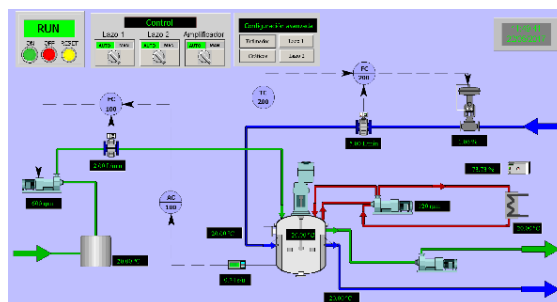


Figura 7. Pantalla principal del HMI

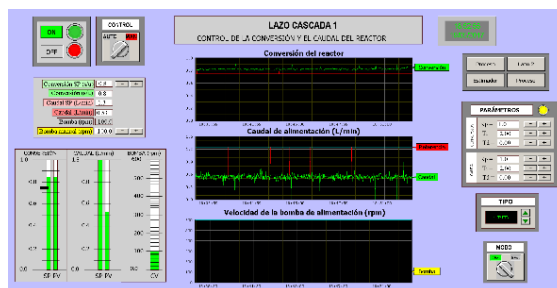


Figura 8. Pantalla de configuración del lazo 1

Además de esta pantalla, se han diseñado otras ventanas donde manipular las características más específicas del sistema de control. Un ejemplo de ello es la Figura 8, donde se muestra la pantalla de la configuración del Lazo 1 de control. Esta pantalla además de permitir visualizar las diferentes variables involucradas en el lazo de control de forma gráfica en tiempo real, muestra los valores numéricamente y en forma de diagrama de barras. También permite, nuevamente, establecer si se quiere utilizar un control manual o automático, elegir el modo de operación de los controladores (ideal o interactivo) y seleccionar el tipo de regulador (PID, PI-D, I-PD o I). Por último, la característica más importante de esta pantalla es que habilita la posibilidad de cambiar la sintonía de los parámetros de cada controlador. Así mismo, se ha diseñado otra pantalla equivalente para la visualización de las características del Lazo 2.

Por último, se han desarrollado otras dos pantallas de configuración avanzada, una para ver gráficas históricas de las diferentes variables involucradas en el proceso, y una que permite especificar los parámetros propios de la reacción que se quiere simular (E_a , ΔH , k_0 , etc.).

5 CONCLUSIONES

Con el trabajo realizado hasta ahora se ha obtenido un buen modelo matemático que simula el comportamiento de la planta piloto que se quiere controlar y se ha diseñado un sistema de control con desacoplamiento estático que permite controlar las variables más importantes del proceso, a ser la conversión de la

reacción y la temperatura del interior del reactor, teniendo poca interacción entre ambos lazos.

Una vez se ajuste la sintonía de los controladores del sistema, se podrá utilizar la planta para simular reacciones de diferente complejidad según se establezcan los parámetros correspondientes desde el sistema SCADA Intouch. Además, desde la interfaz gráfica del sistema SCADA se podrá visualizar la dinámica del proceso y manipular la forma de operar del sistema de control. Es decir, el alumno o investigador que trabaje con la planta podrá experimentar el comportamiento de diferentes reacciones y probar diferentes metodologías de control de forma sencilla manipulando los diferentes parámetros de control desde la interfaz gráfica del sistema SCADA.

Como trabajo futuro se desea implementar un nuevo módulo externo accesible como servidor OPC que realice una optimización del sistema en tiempo real para ajustar las consignas de temperatura y conversión a las condiciones de cada instante, según una función objetivo determinada. Es decir, el plan de futuro es implementar una capa superior de optimización con la que comandar el sistema de control para lograr una operación óptima de la planta.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por la Unión Europea y el Gobierno de España con fondos MINECO/FEDER (DPI2015-70975-P).

Referencias

- [1] J. M. Andújar y T. J. Mateo, «Diseño de Laboratorios Virtuales y/o Remotos. Un caso Práctico,» *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 7, nº 1, pp. 64-72, 2010.
- [2] R. Pastor, J. Sánchez y S. Dormido, «Web-based virtual lab and remote experimentation using easy java simulations,» *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 38, nº 1, pp. 103-108, 2005.
- [3] L. G. Bergh, «A Hybrid Approach to Empirically Test Process Monitoring, Diagnosis and Control Strategies.,» *Thaung K. (eds) Advanced Information Technology in Education. Advances in Intelligent and Soft Computing*, vol. 126., 2012.
- [4] EcosimPro, «EcosimPro,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.ecosimpro.com/>.
- [5] S. Skogestad y I. Postlethwaite, «3.4 Relative Gain Array (RGA),» de *Multivariable Feedback Control*, 2ª ed., New York, John Wiley & Sons, 2005, pp. 82-91.
- [6] S. Skogestad, «Simple analytic rules for model reduction and PID,» *Journal of Process Control*, vol. 13, pp. 291-309, 2003.
- [7] Wonderware, «Wonderware Spain,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.wonderware.es/>.
- [8] J. M. Zamarreño, M. J. de la Fuente y L. F. Acebes, «Desarrollo de un control PID accesible como servidor OPC,» de *Jornadas de Automática*, Bilbao, 2015.
- [1] J. M. Andújar y T. J. Mateo, «Diseño de Laboratorios Virtuales y/o Remotos. Un caso Práctico,» *Revista Iberoamericana de*

LA INFORMÁTICA INDUSTRIAL EN LAS INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Rogelio Mazaeda, Eusebio de la Fuente, José L. González, Eduardo J. Moya, Miguel A. García, Javier García, María J. de la Fuente, Gregorio Sainz, Smaranda P. Cristea
rogelio@cta.uva.es, {efuente, jossan, edumoy, miguel, javgar, mjfuente, gresai}@eii.uva.es,
 smaranda@autom.uva.es.

Departamento de Sistemas y Automática, Escuela de Ingeniería Industriales, Univ. de Valladolid (UVA).

Resumen

El término Informática Industrial se utiliza para dar cabida a un conjunto muy diverso de disciplinas y tecnologías. El encontrar un criterio unificador que articule los diversos enfoques posibles y que ayude, tanto al docente como al alumno, en el proceso de enseñanza/aprendizaje de manera que se brinde conocimiento perdurable y al mismo tiempo actualizado, es una tarea clave. En esta contribución se discuten estas ideas relativas a la docencia de esta disciplina en las diferentes titulaciones de la Escuela de Ingenierías Industriales de la UVA, manifestando ideas de cómo ese marco conceptual puede adaptarse al contexto de las diferentes especialidades.

Palabras Clave: Informática Industrial, Sistemas de tiempo real, lenguajes de programación, educación en control, arquitecturas concurrentes, sistemas distribuidos de control por computadores

1 INTRODUCCIÓN

El uso industrial de la informática tiene características propias, que la distinguen de otras aplicaciones más convencionales, y que se derivan fundamentalmente del hecho de tener que interactuar no solo con el usuario humano, sino sobre todo, con el mundo físico real.

En el departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática (DISA) de la Universidad de Valladolid (UVA), desde hace tres años se ha creado un grupo de trabajo interesado en la docencia de esta disciplina que se ha dado en llamar Informática Industrial. Como resultado de esa labor se han llegado a algunos consensos sobre cómo abordar los estudios de una materia que es muy amplia, que no está siempre bien definida, que exige la precisión que demanda la programación de ordenadores y que lidia con una tecnología que es eminentemente volátil. Estas ideas, que fueron perfiladas para ser aplicadas a la titulación de Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática (GIEIA), han sido plasmadas en los documentos de dos Proyectos de Innovación Docente anteriores, y en sendos artículos [1], [2]. En la presente contribución ampliamos la discusión a todas las titulaciones en la que el DISA tiene

docencia, en el espíritu de experiencias que, con las mismas motivaciones, se han desarrollado por otros grupos de trabajo [3].

El artículo se estructura como sigue: en la sección 2 se hace un breve recorrido por la disciplina, en la sección 3 se establecen algunos principios que han guiado la elección de los temas a impartir, mientras que en la sección 4 se establecen y comentan los temas generales identificados, finalmente en la sección 5 se discute la aplicación de estas ideas al estudio de la disciplina en las diferentes titulaciones de Grado en Ingeniería de la UVA.

2 LA INFORMÁTICA INDUSTRIAL

2.1 ALCANCE DE LA DISCIPLINA

La industria contemporánea sería inconcebible sin los computadores. La informática condiciona todas las actividades de la industria. Es pieza fundamental en el manejo eficiente de cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto (PLM: *product lifetime management*), que incluye: la concepción, el diseño, la puesta en producción e incluso la inevitable obsolescencia del producto. Aunque el concepto englobado en las siglas PLM es mucho más amplio, el elemento informático que mejor lo representa son las herramientas de diseño, ingeniería y fabricación asistidas por ordenador (CAD/CAE/CAM/CAPE)

Hay que tener en cuenta que el producto mismo puede hospedar uno o varios computadores embebidos, práctica que es cada vez más frecuente debido al desarrollo tecnológico que permite el abaratamiento y la miniaturización de estos dispositivos electrónicos.

Una vez puesta en marcha la fabricación industrial del o los productos de que se trate, la informática participa a todos los niveles jerárquicos en que suele concebirse la fábrica actual, tal y como se representa en la conocida pirámide CIM también codificada en el estándar ISA 95 [4] (fig. 1). La misma exhibe, en la parte superior aquellos procesos de gerencia de alto nivel de la fábrica que tienen que ver con la gestión de los recursos instalados y la planificación a medio y largo plazo de la producción (ERP: *Enterprise Resource Planning*), teniendo en cuenta los requerimientos de los clientes (CRM: *Client Relationship Management*), y la eficacia de las

relaciones con otras empresas para mantener cadena de suministros y los inventarios en niveles óptimos (SCM: *Supply Chain Management*). En la base de la pirámide CIM se tiene el control de los procesos de fabricación a nivel de campo, actividad que desde hace décadas se lleva a cabo utilizando computadores más o menos especializados, conectados en red. En las posiciones intermedias se tienen, justo encima del nivel de interacción directa con el proceso físico, una capa de sistemas de control avanzado y supervisión y, funcionando como enlace con la capa de gestión, se localiza el llamado nivel MES, que convierte los objetivos a largo plazo de la capa de gestión, en órdenes concretas para las capas inferiores.

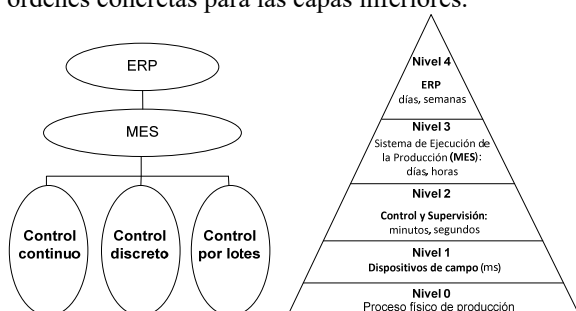


Figura 1: La pirámide ISA-95.

Resumiendo, los tres grandes campos brevemente esbozados, que podríamos clasificar, con todas las precauciones de rigor, como relativos al diseño del producto, integración en el producto mismo y la gerencia de la fábrica a los diferentes niveles jerárquicos, constituyen ejemplos no triviales de aplicación de los computadores a la industria o de “Informática Industrial”. A la hora definir los contenidos propios de esta disciplina, cualquiera de los enfoques mencionados es legítimo.

2.2 ENFOQUE ELEGIDO

En esta contribución, buscando acotar el espectro de los temas a tratar y también procurando la vinculación con los relacionados al control y la automatización, elegimos considerar como temas de interés aquellos que describen la aplicación de los computadores que cumplen con los siguientes rasgos:

1. Tratan fundamentalmente con el mundo físico.
2. Debe reaccionar a diferentes eventos que pueden ocurrir, en principio, simultáneamente y en un orden que no puede ser anticipado.
3. El plazo de reacción del sistema informático al evento está acotado.
4. Los elementos a controlar o supervisar pueden estar dispersos geográficamente.
5. El mal funcionamiento del sistema informático puede acarrear consecuencias muy graves en términos de daños personales o económicos.

Si nos atenemos a los principios mencionados, que no pretenden ser novedosos, excluiríamos de nuestro

interés las aplicaciones de diseño de tipo CAD/CAE, como por ejemplo, sistemas de diseño mecánico, químico o eléctrico, entre otros, que deberían ser abordadas en el contexto de las ingenierías específicas correspondientes. Aquí habría que hacer la salvedad importante de que los sistemas de diseño de soluciones para productos “inteligentes” empotradas, sí que serían motivo de atención legítima.

La informática industrial concebida en los términos antes mencionados, constituye un campo de actividad multidisciplinar que bebe de las fuentes de dos importantes cuerpos teóricos bien asentados: como son la informática o ciencias de la computación y la teoría de sistemas y el control automático. Esta situación intermedia, que indudablemente constituye una señal de la importancia del enfoque que representa, puede ser una desventaja a la hora de afrontar su estudio, debido a la amplitud y diversidad de los temas a tratar, que le otorga un cierto carácter disperso. Dificultades añadidas, se encuentra en la complejidad intrínseca de las fuentes de la se nutre. Tanto la informática como la teoría de control tienen un importante basamento teórico.

En el caso de la ciencia de la computación, se tienen los importantes resultados relacionados con la jerarquía de las gramáticas formales, el análisis de la complejidad computacional y el problema de la decisión [5], además de una plétora de algoritmos profusamente estudiados, de diferentes paradigmas y lenguajes de programación y de patrones de diseño [6].

La teoría de sistemas y el control automático ofrece igualmente un cuerpo teórico casi inabarcable que va desde los conceptos importantes de realimentación y estabilidad, aplicados a sistemas continuos, lineales y no lineales y toda una serie de aplicaciones avanzadas conocidas bajo los rótulos, para mencionar sólo algunos, de control óptimo, robusto, adaptativo, predictivo, etc, y que hace uso de los conceptos de modelado o identificación dinámica de sistemas, de la simulación y la optimización matemática, entre muchas otras técnicas, capaces de lidiar con sistemas inciertos y que dan como resultado soluciones aplicables a todos los niveles de la pirámide de control. Para una reciente y autorizada visión de conjunto de la disciplina ver [7].

Ciertamente, la relación entre la informática y el control automático es muy estrecha y es muy rica en matices. Desde hace décadas, el principal vehículo tecnológico para implementar las soluciones de control son los computadores, ya sean de propósito general o con características específicas como los controladores lógicos programables o PLC. La inmensa mayoría de las aplicaciones de control avanzado, con algoritmos que incluyen el uso en línea de modelos e incluso la optimización matemática de los mismos, serían imposibles sin la capacidad de cálculo que aportan los ordenadores.

2.3 PREVISIBLE EVOLUCIÓN DE LA INFORMÁTICA EN LA INDUSTRIA

Pero la relación entre computadores y control no se limita a concebir los primeros como los vehículos que permiten llevar a la práctica los conceptos del control en el presente momento del desarrollo de la técnica. Por supuesto, el uso de ordenadores motivó en su momento que la teoría de control se ocupara de la necesidad de estudiar los efectos del muestreo y la cuantificación de las señales continuas para su procesamiento digital [8]. Los resultados ya clásicos relativos a sistemas de tiempo discreto se estudian a la par que el enfoque continuo original. Pero en el sentido inverso, también ha existido un influencia notable, la teoría de control hoy acepta, casi en pie de igualdad, las aplicaciones reactivas dedicadas a la automatización de procesos discretos, a partir de los trabajos sobre control supervisor introducidos en [9], esfuerzos teóricos que continúan desarrollándose y que se basan en la aplicación de conceptos y modelos de la ciencia de la computación [10].

De forma que se abre paso un enfoque conjunto en la intersección de estas dos grandes disciplinas, enfoque del que se hace eco en el ya mencionado artículo [7] y que es adoptado por ejemplo en [11]. La confirmación de este nuevo punto de vista, lo constituye la emergencia de conceptos como el de los sistemas ciber-físicos (CPS: *cyber-physical systems*) [12], que promueve el estudio conjunto de la realidad física a controlar y de los controladores basados en computadores conectados en red, ejecutando aplicaciones reactivas distribuidas en tiempo real. En el enfoque CPS, la forma natural de modelado de estos sistemas complejos será híbrida, combinando el modelado continuo, junto a los modelos de eventos discretos. Este enfoque está en la base o muy relacionado con conceptos como el de la **Industria 4.0**, el de internet de las cosas (*IoT*), el uso masivo de datos de diversas fuentes (*big data*), el uso de la nube (*cloud* o *fog computing*) y el uso de redes inalámbricas también para el control [13]. La industria 4.0 es todavía una aspiración más que una realidad asentada, pero ya ha movilizado el interés de la academia y de la industria, y su implantación supone la adaptación del modelo representado por la pirámide ISA-95 a las nuevas exigencias, puesto que sin negarlo tajantemente, la nueva concepción que emerge estimula una arquitectura donde los diferentes actores operen con jerarquías menos rígidas. Los retos a vencer en este nuevo contexto son muy considerables. Para poner solo un ejemplo, un escenario probable será la existencia de lazos de control distribuidos conectados a distancia mediante redes inalámbricas. En este ámbito existen dificultades a vencer relacionadas con el ancho de banda del lazo de realimentación, la posible pérdida de información, el análisis de los riesgos que toda

esta incertidumbre implica, añadido a las amenazas relacionadas con la ciber-seguridad. En este tipo de situaciones existen incentivo en abandonar el uso de los muestreos periódicos, con las simplificaciones teóricas que ello conlleva, para sustituirlo por otro que envíe datos solo cuando la señal de proceso varíe sustancialmente, utilizando un esquema basado en eventos para el control de variables continuas [14].

3 ALGUNAS CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA DOCENCIA DE LA INFORMÁTICA INDUSTRIAL

La Informática Industrial está sin duda en el centro de este esfuerzo de renovación de la industria: lejos de ser una mera colección de tecnologías de *hardware* y *software* útiles para el control constituye el elemento de integración de la industria moderna, y provee un punto de vista unificador basado en el actual enfoque sobre los sistemas tipo CPS.

3.1 PRINCIPALES DESAFÍOS DOCENTES

En la docencia se deben vencer importantes desafíos:

1. Amplia base teórica en la intersección de la ciencia de la computación y la teoría de sistemas y el control automático.
2. La programación de computadores requiere de un muy alto nivel de compromiso por parte del programador. Es implacable con los errores sintácticos o semánticos. Supone la adquisición de habilidades que requieren tiempo y práctica. La programación de aplicaciones reactivas de tiempo real agrava de manera importante esta situación y exige procedimientos fiables de verificación y validación.
3. Las tecnologías concretas, tanto de hardware como de software, típicamente se hacen obsoletas muy rápidamente.
4. Múltiples aplicaciones de carácter diverso, transversal y de interés, en diverso grado, para todas las titulaciones de ingeniería. La informática es importante a diversos niveles de la industria y sus temas de interés van desde las aplicaciones de control a nivel de campo, o a nivel de la automatización de dispositivos empujados, hasta aplicaciones de optimización económica o planificación a medio plazo en la capa MES. Existen además campos específicos de aplicación con una entidad propia, como son: la robótica, la visión artificial, la mecatrónica, los vehículos guiados automáticamente (AGVs), entre otros. Cada una de estas aplicaciones requiere un conjunto muy específico de conocimientos y habilidades a diferentes niveles de abstracción.

4 TEMAS FUNDAMENTALES

A la luz de la discusión en las secciones previas, se han identificado un conjunto de grandes temas de los cuales extraer los contenidos concretos para impartir en la disciplina. Los temas elegidos constituyen una puesta al día de los adoptados en una contribución previa por parte de los mismos autores [1].

Tabla 1: Temas

N.	Tema	Descripción
1	La informática en la industria	Pirámide CIM (ISA-95) e Industria 4.0.
2	Sistemas reactivos	El computador en el lazo de control de sistemas continuos, discretos e híbridos. Implicaciones en el hardware, Sistema operativo, lenguaje de programación.
3	Bases teóricas y modelado formal	Sistemas continuos muestreados, de eventos discretos e híbridos. Modelado.
4	Prog. concurrente	Concurrencia y paralelismo.
5	Sistemas de Tiempo Real (STR)	Conceptos y algoritmos.
6	Sistemas Distribuidos y redes industriales	Redes industriales. Determinismo, latencia y ancho de banda. Control distribuido.
7	Ciber-seguridad y seguridad funcional	Seguridad funcional y frente a ciber-ataques
8	Sistemas de control industrial	Sistemas de control industrial. PLCs, DCSs, SCADAS. Aplicaciones especiales: mecatrónica y AGVs, visión artificial.

La numeración de los temas en la tabla 1 sugiere una precedencia en la exposición temporal que resulta además inevitable. No debe, sin embargo, interpretarse como delimitando temas aislados y auto-contenidos. Por el contrario, el éxito de un curso de esta naturaleza está en encontrar un relato común unificador que viene inicialmente expresado por el contenido de los temas 1 y 2. En el tema 2 se ofrecen los conceptos centrales de sistema reactivo, de las implicaciones que estos tienen en su relación con el mundo físico que es simultáneo y exige repuestas con plazos temporales bien determinados. Ahora bien, la existencia de esos plazos, el menor o mayor margen temporal que brinden, el hecho de si son periódicos o

disparados por eventos relacionados con el comportamiento de alguna otra variable diferente al tiempo, los riesgos más o menos graves en que se incurre al violarlos, entre otras muchas cosas dependen, en gran medida, de la posición en la pirámide ISA-95 con la que se lidie o de si se trata del controlador para un sistema empotrado. De manera que este tema 1 debe servir, no de mera introducción sino, junto con el tema 2, de hilo conductor y *leitmotiv* de todo el curso.

Abundando en este concepto, una aplicación del nivel MES, pongamos por caso, la programación óptima de la operación de una fábrica que debe funcionar con un plan a varios días vista, puede ser considerado un sistema de tiempo real, pero los riesgos de no cumplir el plazo exigido son menores (quizá un funcionamiento sub-óptimo durante algunas horas) que el riesgo de incumplir el de responder con una latencia excesiva ante una condición crítica que ocurra en el Nivel 1 con un controlador de campo que además debe ofrecer respuestas correctas en plazos mucho más cortos. Las redes de computación constituyen otro ejemplo muy claro: los requisitos de predictibilidad, de ancho de banda y de latencia exhibidos por el protocolo y la implementación de red utilizados serán, en general diferentes, para los distintos niveles y aplicaciones: redes de campo predecibles, de baja latencia y poco tráfico en los niveles inferiores y otras más convencionales en los niveles superiores. Otro tanto se tiene con los aspectos de ciber-seguridad y seguridad funcional (tema 7) y por supuesto, las características, el tipo de lenguaje o de aplicación programables o configurables explicados en el tema 8, dependerán claramente del nivel al que nos encontramos: sistemas de control en campo (FCS) tipo PLC en los niveles de control más bajos, sistemas de control distribuido (DCS) en una capa algo superior y todavía por encima sistemas supervisores tipo SCADA, bases de datos de históricos y sistemas de ayuda a la decisión basados en dichos datos.

El tema 3 cubre los pre-requisitos básicos derivados de las dos grandes disciplinas teóricas de las que se nutre la informática en la industria. El grado de profundidad con que se aborde este tema dependerá de los conocimientos previos del alumno adquiridos en el contexto de la titulación. Un breve recordatorio de las implicaciones del muestreo y la cuantificación en el control por ordenador de los procesos continuos, no sería nunca tiempo mal empleado. En lo que concierne al modelado formal de sistemas discretos, se puede dedicar algún tiempo a explicar diferentes alternativas que van desde la utilización de autómatas finitos (FSM: *finite state machines*), a los *state-charts* que aportan más claridad puesto que permiten lidiar con la complejidad y contener la explosión de estados que ocurre rápidamente con las FSMs, utilizando un planteamiento jerárquico que da

cabida al modelado de procesos concurrentes, o incluso una breve introducción a las redes de Petri básicas, que ayudan a explicar, de una forma muy tersa e intuitiva, no sólo el modelo de la planta discreta a controlar sino el funcionamiento del propio controlador, y que es especialmente útil al entender las complejidades de la operación concurrente de las aplicaciones de control. Algunas nociones de modelado híbrido serían también oportunas: máquina de estado finita donde cada estado discreto constituye un modo de operación en las que las variables continuas evolucionan según dinámicas diferentes expresadas por ecuaciones diferenciales y algebraicas (DAEs), brindarían el marco teórico adecuado para el estudio de los CPS.

Los temas 5, 6 y 7 deben constituir el grueso de la disciplina. Aunque no es el único modelo de computación adecuado para los sistemas reactivos, la utilización de la concurrencia, es todavía hoy, a pesar de las complejidades que impone en el diseño, en la verificación y en la validación de las aplicaciones, el paradigma preferido para emular, desde el computador, la simultaneidad real del mundo físico. La implementación de la concurrencia, impone **requisitos** en el hardware, en el sistema operativo y en el lenguaje de programación en combinación con el uso de librerías especializadas. La concurrencia, en presencia de un solo núcleo de procesamiento, no busca aumentar la utilización útil de la potencia de cómputo, que disminuye inevitablemente por los necesarios cambios de contexto. En los ordenadores actuales de varios núcleos si puede darse un aumento neto de la capacidad de cómputo (paralelismo), pero la existencia de más tareas que núcleos constituye una situación típica que nos vuelve a llevar a la situación de partida, pero incrementado la complejidad del problema. En cualquier caso, la concurrencia sí que puede disminuir la latencia en la respuesta a eventos externos, periódicos o esporádicos; pero lo que es más importante, permite la búsqueda “separación de preocupaciones”: el diseñador de la aplicación puede separar, de forma lógica, la atención a los diferentes eventos que pueden ocurrir en la realidad en orden que no es previsible. Pero fundamentalmente, la división en tareas concretas, individuales, brinda al planificador del sistema en tiempo real (STR) las unidades de cómputo básicas que deben ser planificadas con precisión para cumplir los plazos especificados por el diseño. Por supuesto, pueden existir aplicaciones empotradas muy simples donde la concurrencia no aporte ningún beneficio. Por otra parte, la complejidad que se introduce en el proyecto, aumenta de forma drástica sobre todo cuando las tareas deben ser sincronizadas o comunicadas entre sí, como es habitualmente el caso. Pueden darse situaciones anómalas como las condiciones de competencia (“*race conditions*”) o de bloqueo (“*deadlock*”) difíciles de detectar y de evitar.

Nótese que la concurrencia puede darse a nivel de hilos, que permiten un cambio de contexto más ágil y el intercambio de datos a través de la memoria común que comparten o de procesos, típicamente aislados por el sistema operativo en espacios de memoria separados y que deben recurrir a mecanismos de comunicación y sincronización, también provistos por el S.O., más lentos pero más robustos como los basados en intercambio de mensajes.

El tema 5 debe explicar las bases de los STR. Los tipos de planificadores que existen, si la planificación se realiza fuera de línea o en línea y los algoritmos más comunes, sus ventajas y desventajas. El manejo de prioridades para las distintas tareas, entre otras muchas complejidades. Para muchas aplicaciones será suficiente una aproximación a la aplicación reactiva del tipo “mejor esfuerzo” con plazos no rígidos, pero para otras será necesaria la utilización de STRs rigurosos o de “tiempo real duro”. La introducción de las prioridades añade complejidad a la programación concurrente y supone retos como la inversión de la prioridad que pueden causar situaciones de bloqueo muy sutiles.

Los computadores convencionales, tanto a nivel de hardware como de S.O., están diseñados con el propósito de dar una experiencia satisfactoria al usuario humano y no para las aplicaciones de control: la existencia de niveles de memoria cache o la implementación de la memoria virtual a nivel del S.O., implican amenazas directas al determinismo que se debe exigir a este tipo de sistemas. Los sistemas especializados para el control como PLCs y DCSs, menos versátiles y expresivos, son más predecibles para aplicaciones críticas.

El tema 6 de sistemas distribuidos presenta todas las características de los sistemas concurrentes en tiempo real basados en procesos, añadiendo las complejidades que se derivan del uso de redes informáticas.

El estudio de las aplicaciones concurrentes, en tiempo real y posiblemente distribuidas debe ser acompañado por la descripción de patrones de diseño de software y buenas prácticas de programación que serán fundamentales para garantizar una seguridad funcional adecuada, que es el contenido del tema 7, junto con las medidas necesarias para la prevención de ataques informáticos, mucho más peligrosos en un ambiente industrial.

Tiempo real, como se conoce, no significa velocidad de ejecución de las tareas sino el cumplimiento de los plazos. Pero, en la medida en que esos plazos se acortan, la velocidad de cálculo y la forma en que está se degrada con el tamaño del problema a resolver, se vuelven cada vez más importante. En este sentido, los resultados clásicos de la ciencia de la computación sobre la complejidad de los algoritmos no deben pasar inadvertidos al alumno de la disciplina (tema 3).

El acudir en todo momento a soluciones de control realistas (tema 8), a la explicación de arquitecturas típicas y de casos de estudios específicos para diferentes tipos de industria brinda el contenido práctico que esta asignatura debe propiciar. También, en dependencia del caso, podrán ser motivo de discusión aplicaciones de naturaleza más particular como la mecatrónica, los AGVs y la visión artificial, siempre muy atractivos al alumno. Aunque las aplicaciones de robótica caen perfectamente dentro de la definición de Informática Industrial que se ha adoptado, su importancia y envergadura teóricas, sin embargo, las hacen de difícil encaje en la visión generalista que aquí suponemos para la disciplina.

5 DOCENCIA DE LA DISCIPLINA EN LA EII DE LA UVA.

En lo que sigue se discute la estrategia adoptada para los estudios de la disciplina de II en la EII de la UVA en aquellas asignaturas a cargo del DISA.

5.1 PRINCIPIOS ADOPTADOS

A los desafíos a la docencia enumerados en la sección 3.1, debe añadirse la dificultad de que deben ser afrontados en el tiempo tasado y generalmente escaso de que se dispone y de ponerlos en sintonía con los objetivos y competencias de cada titulación y en el contexto del resto de las asignaturas.

Una idea central como ya se ha esbozado, es la de utilizar como referencia o *leitmotiv* de los contenidos del curso la ubicación en el nivel correspondiente de la pirámide CIM. Por otra parte, la asignatura debe exhibir un enfoque fundamentalmente práctico, que involucre a un nivel de abstracción u otro, la programación o al menos la configuración de aplicaciones de naturaleza industrial. Para dotar de valor permanente a los contenidos, se debe acudir a resultados bien establecidos de la teoría de sistemas o control y la ciencia de la computación, y presentar algoritmos y buenas prácticas sobre la programación de sistemas distribuidos, concurrentes en tiempo real. Se preferirán soluciones y protocolos refrendados por normas de facto o sancionadas por organismos internacionales. El carácter de la disciplina aconseja un estilo de docencia, que en consonancia con el Espacio Europeo de Educación Superior (EEES), privilegie modelos de enseñanza colaborativos, basados en proyectos y el uso fundamental del laboratorio, reduciendo el tiempo dedicado a la tradicional clase magistral.

5.2 ENFOQUE EN LAS DIFERENTES TITULACIONES

En la figura 2 se grafican las asignaturas de las diferentes titulaciones susceptibles de acoger la

disciplina de la Informática Industrial y aquellas que están relacionadas con ellas. El grado de Diseño Industrial no se representa porque la disciplina está ausente del mismo, aunque previsiblemente estén incluidas, de forma preferente, aplicaciones de la informática relacionadas con el ciclo de vida de los productos diseñados (PLM).

En el Grado en Organización Industrial se tiene únicamente la asignatura de Automatización Industrial como vehículo susceptible de dar contenidos relacionados con lo que nos ocupa en el presente estudio, utilizando, por ejemplo, el estudio de los PLCs. En esta titulación, se estudiarán sin duda, aunque no impartida por el DISA, aplicaciones de la capa ERP y MES relacionadas, por ejemplo con la planificación a largo, medio y corto plazo de las operaciones industriales y con el manejo óptimo de la línea de suministros (SCM).

Todas las titulaciones comparten asignaturas básicas de la rama industrial como Fundamentos de Informática (FI), Fundamentos de Automática (FA) y Sistemas de Producción y Fabricación (SPF). En FI se solía impartir C, pero a partir del año pasado se ofrece una variante imperativa del C++, que hace hincapié en el uso, más que en el diseño, de clases y objetos. Esto abre la puerta a trabajar a un nivel de abstracción mayor haciendo uso de elementos como la biblioteca STL. Por otra parte, el concepto de clase y de programación orientado a objetos será beneficioso en el estudio de otros lenguajes más abstractos como aquellos que utilizan el concepto de bloques funcionales en la configuración de DCS. En FA se dan los elementos básicos de la teoría de control de sistemas continuos. Mientras que en SPF (compartida por varios departamentos) se ofrece una colección variopinta de conceptos de interés sobre la industria contemporánea pero las limitaciones de tiempo impiden un tratamiento a fondo de los mismos.

El GIEIA es el que más posibilidades ofrece de desplegar el temario discutido en la sección anterior. Los temas de la tabla 1 se han repartido entre las asignaturas de Informática Industrial (II) propiamente dicha y Control y Comunicaciones Industriales (CCI), referimos al lector a [1] para discusión detallada, pero en resumen, en II se hace énfasis en el tema 4 de programación concurrente en C++ v11 utilizando las posibilidades nativas que ahora se ofrecen para la programación de hilos [15], [2] y una versión reducida del estándar POSIX para concurrencia mediante procesos, aplicados siempre a sistemas discretos. En CCI, una vez que el alumno ha dado sistemas muestreados en la asignatura obligatoria Diseño de Sistemas de Control, se está en condiciones de aplicar los conceptos contenidos en los temas 5 y 6, aplicados ya a sistemas continuos. El resto de los temas permean todo el enfoque adoptado.

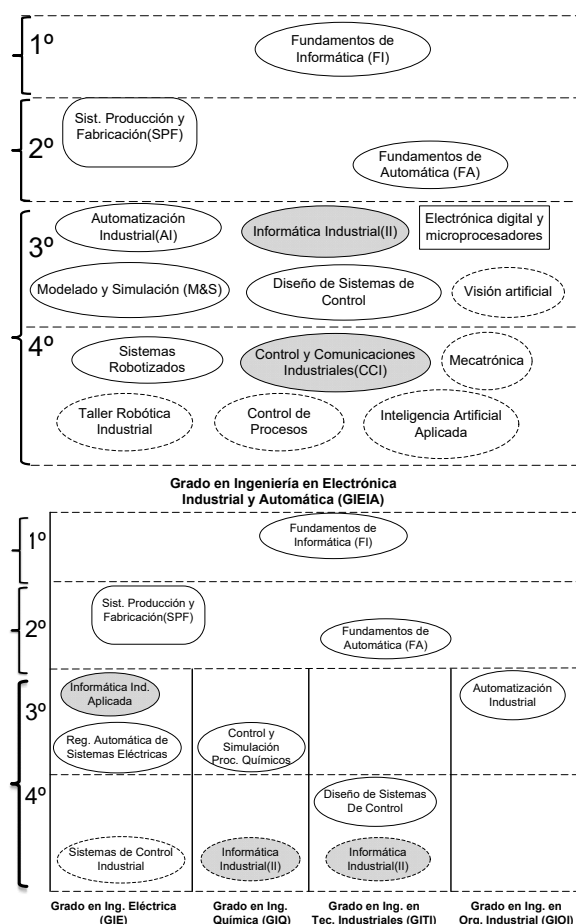


Figura 2: (a) Titulación GIEIA (b) Resto de las titulaciones (obligatorias en línea continua, optativas en línea de puntos)

El lenguaje que se ha utilizado es el C++ v11, un lenguaje de propósito general, que brinda un compromiso razonable entre nivel de abstracción y capacidad de bajar a nivel de hardware para las aplicaciones empotradas. La posibilidad de trabajar a otros niveles de abstracción como los bloques funcionales utilizados en los PLCs que cumplen la norma IEC 61131-3 [16] o para sistemas distribuidos con la norma IEC 61499 [17], no es discutida en profundidad puesto que es objeto de estudio de otras asignaturas como Automatización Industrial. Los temas más especializados de robótica, mecatrónica y visión artificial tienen sus propias asignaturas dedicadas. Se estudia la posibilidad de impartir bases de datos de tiempo real y de series temporales históricas, o así como el estándar de interoperabilidad OPC (clásico/UA) [18] muy útil para la obtención de datos reales o simulados en el laboratorio, así como un primer contacto con el mencionado IEC 61499. En otras titulaciones la situación es más constreñida en término de créditos lectivos. En el Grado en Ingeniería Eléctrica (GIE) la asignatura de Informática Industrial Aplicada precede a otra asignatura obligatoria (Regulación Automática de Sistemas Eléctricos) y una opcional (Sistemas de

Control Industrial) que podrían resultar complementarias. En cualquier caso, la estrategia seguida y considerada idónea dadas las circunstancias es la de establecer el marco presente y futuro (tema 1) de la disciplina para hacer énfasis en los sistemas de control industrial tipo PLCs, DCSs y SCADA y la programación en los estándares pertinentes por una parte, y en las redes industriales, sus requisitos a partir del estándar OSI o similares por otra, profundizando especialmente en el protocolo OPC por las ventajas prácticas ya comentadas.

En el Grado en Ingeniería Química (IQ) la situación es especialmente desfavorable. Se cuenta con una asignatura optativa, impartida después de Control y Simulación de Procesos Químicos que de alguna manera refuerza, con ejemplos de esa especialidad concreta, lo dado en FA. La estrategia seguida en este escenario es la de comentar someramente todos los temas delineados y estudiar, con más detalle, los sistemas de supervisión tipo SCADA, con el OPC de nuevo como tecnología que propicia la movilidad de la información entre los diferentes niveles de la pirámide CIM. En este caso concreto se discuten conceptos de herramientas de ayuda a la decisión, muy valiosos para la titulación, relacionadas con el control estadístico de procesos multi-variantes.

En el Grado en Tecnologías en Industriales (GITI) se discuten la esencia de los temas recogidos en la tabla 1 en el marco de la asignatura, también optativa, llamada Informática, en la que se sigue la tónica general planteada y se hace énfasis sobre los sistemas de control distribuido basados en el estándar IEC 61499.

5.2.1 Laboratorios

Las prácticas de laboratorio, como se ha recalado, resultan básicas. Existe el interés consciente de utilizar productos y lenguajes basados en normas y de ser posible, soluciones que estén libremente disponibles. Esto desde luego no es posible, y discutiblemente, tampoco es conveniente en todos los casos. Con el C++ v11 y librerías basadas en POSIX como vehículo para la enseñanza del temario, no habría mayores problemas. Pero tampoco se tiene por qué renunciar, por ejemplo, a MATLAB y las herramientas de modelado continuo y discreto que éste ofrece y que brindan además la facilidad de desplegar, a partir del modelo creado, verificado y validado, soluciones en plataformas empotradas. Existen además *toolboxes* de libre adquisición, como TrueTime [19] útiles a la hora de mostrar las bondades de uno u otro algoritmo de planificación de tiempo real en presencia de comunicaciones con simulación de pérdida de datos.

Por otra parte, los alumnos aprecian en gran medida, el ser capaces de practicar sobre productos comerciales de importancia acreditada y de amplia

utilización en la industria, como pueden ser los PLCs de Siemens y los DCS de Emerson (DeltaV). Software comercial como el generador de SCADAS *Wonderware Intouch* (Foxboro) o el sistema supervisor PI de OSISOFT, ofrecen un valor añadido que es muy apreciado por el alumno. En nuestras instalaciones de laboratorio, a partir de la existencia de estos productos comerciales, se pueden reproducir prácticamente todos los niveles desde el MES hacia abajo con productos como los mencionados y aplicarlos a plantas reales de laboratorio o a una simulación no trivial a tiempo real de una fábrica de azúcar de remolacha.

CONCLUSIONES

La informática industrial ha pasado de ser una mera herramienta tecnológica, a estar en el centro de la industria contemporánea y del previsible desarrollo futuro de la misma. En esta contribución se ha brindado un recorrido por los principales temas a tratar y se han discutido algunas ideas sobre el abordaje docente de los mismos en dependencia del tiempo disponible y de los objetivos y el contexto de la titulación.

Agradecimientos

Contribución realizada en el marco del Proyecto de Innovación Docente (PID1617_105) de la UVA titulado: La Informática Industrial en los Estudios de Ingeniería Industrial. Los autores agradecen el apoyo del proyecto INOPTCON (MINECO/FEDER DPI2015-70975-P).

Referencias

- [1] R. Mazaeda, E. de la Fuente, J. L. González, and E. J. Moya, "Sobre la docencia de la informática industrial," in *Actas de las XXXVI Jornadas de Automática*, Bilbao, 2015, pp. 688–695.
- [2] R. Mazaeda, E. de la Fuente, J. L. González, and E. J. Moya, "Docencia en Informática Industrial: Lenguajes de Programación," in *Actas de las XXXVII Jornadas de Automática*, Madrid: Comité Español de Automática (CEA-IFAC), 2016, pp. 631–638.
- [3] F. Rodríguez, J. C. Moreno, M. Castilla, M. Berenguel, J. L. Guzmán, and J. A. Sánchez, "Experiencia docente de la materia Informática Industrial en estudios de Ingeniería," in *Actas de las XXXVII Jornadas de Automática*, Comité Español de Automática (CEA-IFAC), 2016, pp. 762–768.
- [4] B. Scholten, *The Road to Integration: A Guide to Applying the ISA-95 Standard in Manufacturing*. ISA, 2007.
- [5] J. E. Hopcroft, R. Motwani, and J. D. Ullman, *Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation (3rd Edition)*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2006.
- [6] E. Gamma, R. Helm, R. Johnson, and J. Vlissides, *Design Patterns: Elements of Reusable Object-oriented Software*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1995.
- [7] K. J. Åström and P. R. Kumar, "Control: A perspective," *Automatica*, vol. 50, no. 1, pp. 3–43, 2014.
- [8] B. Wittenmark, K. J. Åström, and K. E. Årzen, "Computer Control: An Overview," *IFAC Prof. Br.*, pp. 1–82, 2002.
- [9] P. J. Ramadge and W. M. Wonham, "Supervision of discrete event processes," *Proceeding IEEE*, vol. 77, no. 1, pp. 2–3, 1982.
- [10] C. Seatzu, M. Silva, and J. H. van Schuppen, *Control of Discrete-Event Systems*, vol. 433. Springer, 2013.
- [11] E. Ashford Lee and P. Varaiya, *Structure and Implementation of Signals and Systems*. 2011.
- [12] K.-D. Kim and P. R. Kumar, "An Overview and Some Challenges in Cyber-Physical Systems," *J. Indian Inst. Sci.*, vol. 93, no. 3, pp. 341–352, 2013.
- [13] Y. Lu, "Industry 4.0: A Survey on Technologies, Applications and Open Research Issues," *J. Ind. Inf. Integr.*, 2017.
- [14] S. Dormido, J. Sánchez, and E. Kofman, "Muestreo, Control y Comunicación Basados en Eventos," *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind. RIAI*, vol. 5, no. 1, pp. 5–26, 2008.
- [15] A. Williams, *C++ Concurrency in Action. Practical Multithreading*. Manning, 2012.
- [16] A. Otto and K. Hellmann, "IEC 61131: A general overview and emerging trends," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 3, no. 4, pp. 27–31, 2009.
- [17] V. N. Dubinin and V. Vyatkin, "Semantics-robust design patterns for IEC 61499," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 8, no. 2, pp. 279–290, 2012.
- [18] M. H. Schwarz and J. Borek, "A survey on OPC and OPC-UA: About the standard, developments and investigations," *2013 XXIV Int. Conf. Information, Commun. Autom. Technol.*, pp. 1–6, 2013.
- [19] A. Cervin, D. Henriksson, B. Lincoln, J. Eker, and K.-E. Årzen, "How does control timing affect performance? Analysis and simulation of timing using Jitterbug and TrueTime," *IEEE Control Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 16–30, Jun. 2003.

Ventajas docentes de un flotador magnético para la experimentación de técnicas control

Eduardo Montijano*, Carlos Bernal, Carlos Sagüés, Antonio Bono, Jesús Sergio Artal
 Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón, Universidad de Zaragoza
 Contacto: emonti@unizar.es

Resumen

En este trabajo se plantea la utilización de un flotador magnético para implementación, puesta a punto y evaluación de estrategias de control en el ámbito de las asignaturas de control de sistemas. Este sistema flotador presenta varias ventajas didácticas desde el punto de vista del control comparado con la versión más popular y utilizada del levitador magnético, manteniendo bastantes de las propiedades del segundo ejemplo. En el artículo se plantean y comparan los modelos matemáticos de ambos sistemas, demostrando las virtudes pedagógicas del flotador. El artículo también incluye resultados de evaluación de diferentes controladores, así como de estimación de variables del sistema.

Palabras clave: Levitador magnético, flotador magnético, innovación docente, teoría de control.

1. Introducción

La teoría de sistemas y su aplicación al control automático conforman una disciplina con gran presencia en la mayor parte de los estudios de ingeniería. Al tener unos fundamentos fuertemente teóricos, que suelen requerir de un gran nivel de abstracción por parte de los estudiantes, la utilización de ejemplos de control reales se convierte en una necesidad en el ámbito docente para garantizar la correcta asimilación de todos los conceptos. Un sistema ampliamente utilizado a la hora de conseguir este objetivo es el levitador magnético [1].

Así, el método pedagógico utilizado es el “learning by-doing”, una técnica didáctica que aprovecha el método científico y curiosidad de los propios estudiantes para fomentar un aprendizaje más profundo y significativo. La literatura centrada en investigación educativa recoge que en contextos universitarios resulta muy útil incorporar este tipo de metodologías activas como estrategia de aprendizaje para crear una dinámica de juego [2, 3], con el propósito de motivar a los estudiantes y que asimilen conceptos de una forma divertida y amena.

Todo ello se traduce en una mejor asimilación de conocimientos junto con un mayor desarrollo de competencias, habilidades y destrezas en el estudiante [4]. En resumen, conlleva un incremento en la eficacia del proceso de enseñanza-aprendizaje.

Un posible montaje de levitación magnética se muestra en la Figura 1 y ha sido estudiado, por ejemplo en [5, 6] desde una perspectiva centrada en el control. Consta de una bobina, que genera una fuerza en un imán, que a su vez es detectado por un elemento Hall. El control es digital, mediante un circuito de acondicionamiento, driver de potencia y algoritmo en tiempo real que se diseñan en la misma asignatura.

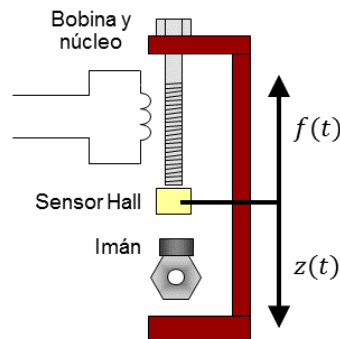


Figura 1: Esquema del levitador magnético

Este levitador presenta dos dificultades desde el punto de vista de su control: la no-linealidad de algunas de sus partes y la inestabilidad. Se trata de un sistema naturalmente inestable, lo que hace que sin la presencia del controlador la tuerca no levite, o se cae al suelo o se pega al imán. Una vez que se resuelve el problema de la inestabilidad también se pueden plantear los objetivos de control en la forma clásica (sobre-oscilación, tiempo de respuesta, error de posición, etc.) o avanzada (capacidad de adaptación, control no-lineal, identificación de sistema, etc.).

Siendo un ejemplo completo, fácil de montar y barato, se ha observado que la inestabilidad del sistema genera muchos problemas de cara a la falta de progresividad en el aprendizaje de los alumnos,

ya que la obtención de los parámetros del modelo es altamente compleja y muy sensible a pequeñas perturbaciones, hecho que complica en gran medida el posterior proceso de control. También dificulta el proceso de evaluación y de laboratorio. Una vez formulado un control resulta complicado para el alumno depurar su funcionamiento, ya que no alcanzar las especificaciones (estabilidad o respuesta) puede ser debido a errores propios conceptuales en el trabajo o a inexactitud en el modelado. Esto ha reducido, en nuestra opinión y experiencia, el aprovechamiento del trabajo práctico y la eficiencia de aprendizaje.

Para poder resolver en parte la falta de progresividad del levitador, la principal contribución de este trabajo es el desarrollo de un sistema diferente, que se muestra en la Fig. 2 y que llamaremos flotador. Se construye a partir del levitador, invirtiendo el orden de los elementos: arriba sensor, tubo con imán y bobina con un imán polarizador. La alteración en la dirección de las fuerzas hace del flotador un sistema naturalmente estable, lo que simplifica el modelado, la implementación y visualización de las virtudes de diferentes controladores. En el documento se han enfatizado las oportunidades educativas que proporciona este sistema, así como el incremento en la participación e interacción de los estudiantes en el aula [7, 8, 9]. El modelo desarrollado ha sido simulado, posteriormente ensamblado, testeado y validado de manera experimental.

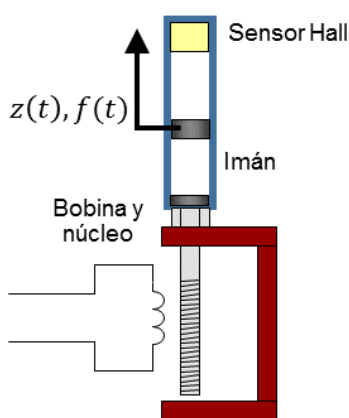


Figura 2: Esquema del flotador magnético

El resto del trabajo se organiza de la siguiente manera: La sección 2 describe la asignatura en la que se ha implantado este sistema, Diseño Electrónico y Control Avanzado. La sección 3 contiene una descripción más detallada de todas las componentes que forman el flotador. Los modelos matemáticos del levitador y el flotador se comparan en la Sección 4, poniendo de manifiesto las ventajas del

segundo con respecto al primero. En la Sección 5 se muestran los resultados que se obtienen con el flotador al utilizar algunas de las técnicas que se explican en la asignatura basadas en espacio de estados. Por último, las conclusiones y posibles líneas de trabajo futuro se describen en la Sección 6.

2. Descripción de la asignatura

La asignatura de Diseño Electrónico y Control Avanzado [10] es una asignatura multidisciplinar del Máster en Ingeniería Industrial de la Universidad de Zaragoza en la que participan profesores del departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones (encargados del diseño electrónico) y del departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas (encargados del control avanzado). La asignatura combina la enseñanza de las técnicas modernas de diseño electrónico y programación de microcontroladores con las técnicas avanzadas de control, centradas en el diseño de reguladores para sistemas lineales en espacio de estados.

Como pre-requisitos, el alumno que se matricula en la asignatura ha debido cursar previamente asignaturas relacionadas y posee conocimientos de electrónica digital y de potencia así como de control de sistemas y la automatización. Sin embargo, es posible que su capacidad para trasladar la abstracción matemática del control a los sistemas reales sea un poco limitada. Se trata por tanto de que pueda rápidamente implementar sus conocimientos básicos, así como implementar y evaluar técnicas más avanzadas de estimación y control de sistemas.

Con el objetivo de asimilar los conceptos teóricos, para superar la asignatura los alumnos tienen que resolver un proyecto que abarca las dos partes de la asignatura. El trabajo representa el 60 % de la evaluación de la asignatura, lo que lo convierte en el pilar fundamental de la misma. Es por ello, que la elección de un buen sistema es crucial de cara al aprendizaje y la evaluación de los alumnos.

En los primeros años de impartición de la asignatura este proyecto consistió en desarrollar un sistema completo de control de un levitador magnético. Los alumnos se encargaban de hacer el diseño electrónico de una etapa de acondicionamiento para tratar la medida de un sensor Hall y su lectura desde una placa Arduino Due, así como el montaje de un driver PWM sobre la salida correspondiente del microprocesador. Con el modelo del sistema real calculaban algoritmos de control y finalmente los implementaban en el microprocesador utilizando las técnicas de tiempo real y aritmética de computador explicadas en clase. Aunque para el

proceso de aprendizaje la utilidad del levitador ha quedado demostrada, en los dos años que se ha utilizado se han podido observar ciertas limitaciones y dificultades de este sistema. En particular, este es un sistema naturalmente inestable y fuertemente no lineal tanto en el propio sistema como en el sensor Hall. Esto hace que resulte difícil ajustar el funcionamiento estable y robusto de los controladores calculados. Como consecuencia el alumno es incapaz de aislar los elementos y no sabe si los problemas aparecen en el modelado, en la identificación de los parámetros, en sus conocimientos de control o incluso en la propia implementación hardware o software.

Con el objetivo de eliminar algunas de estas limitaciones, aquí se propone la utilización de un sistema alternativo para el trabajo que, por un lado mantenga las propiedades positivas de su predecesor, abarcando todos los elementos trabajados en la asignatura, pero que a la vez elimine los problemas del sistema original. En concreto, la propuesta es utilizar como sistema del trabajo un flotador magnético. Este sistema es no lineal también, lo que permite enfatizar la cruda realidad pero es naturalmente estable, lo cual hace mucho más fácil identificar los parámetros, en las fases iniciales del desarrollo y el aislamiento de cada parte del desarrollo.

3. Descripción del flotador magnético

En la Figura 3 se muestra el sistema del flotador, con todas las circuitos que intervienen en el mismo. Por un lado, en la parte superior de la figura, a la derecha, se encuentra el imán flotando sobre el tubo, que es el elemento que se desea controlar. En el tubo se pega una regla graduada, para poder medir visualmente la altura del imán en cada momento. La parte superior del tubo lleva unido el sensor Hall de tipo lineal y ratiométrico, mientras que en la parte inferior se encuentra la bobina, encargada de generar la fuerza que controla la posición del imán. En la parte inferior del tubo hay otro imán de neodimio (material N35) que genera una polarización, de forma que en reposo se alcanza una altura de equilibrio.

Por otro lado, en la parte inferior de la figura se observa el micro-controlador (un Cortex M3 de Atmel), basado en una placa Arduino Due, y un módulo que incorpora el driver y la etapa de acondicionamiento. En la asignatura también se trata de enseñar a diseñar la electrónica que permite el interface del control con el exterior. La etapa de acondicionamiento, encargada por un lado de transformar las tensiones del sensor Hall a tensiones adecuadas para la placa y por otro lado en-

cargada de suministrar la tensión adecuada a la bobina mediante un convertidor DC-DC basado en un PWM bipolar.

Por último, en la parte posterior de la figura se observa el osciloscopio utilizado para identificar el sistema y depurar el diseño electrónico, y (se ve parcialmente a la izquierda) una fuente de alimentación encargada de suministrar potencia. La programación se realiza mediante el entorno de desarrollo Arduino en el computador y la depuración del software con el propio monitor serie que lleva integrado dicho entorno.

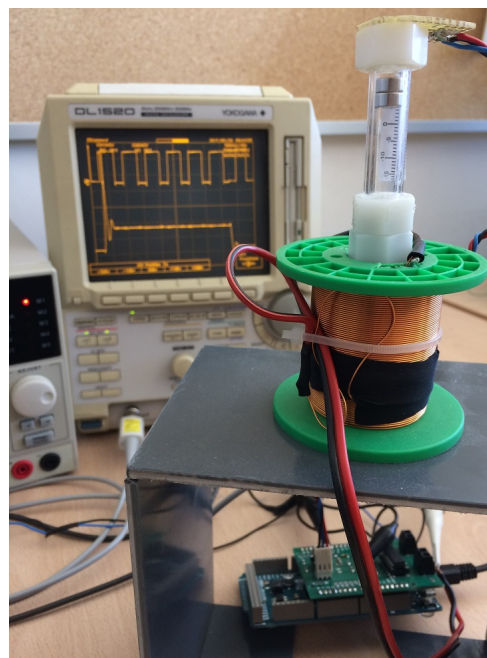


Figura 3: Flotador magnético.

Desde el punto de vista electrónico, es importante notar que el flotador no presenta diferencias significativas respecto a su predecesor. Los dos sistemas utilizan las mismas componentes hardware, por lo que la etapa de acondicionamiento encargada de transformar los niveles de de tensión que proporciona el sensor Hall a niveles compatibles con el micro-controlador, es la misma (una etapa de amplificación diferencial). Esto también hace que la transformación de las medidas del sensor tampoco cambie. Tampoco los conceptos electrónicos que subyacen: aritmética de computador, cuantificación, muestreo y organización de tiempo real de las tareas.

De igual manera, la parte de programación del microcontrolador sigue estando presente sin modificaciones. Todos los problemas relacionados con la división del código del controlador en varias tareas con diferentes prioridades y muestreos, así como los problemas relacionados, tanto del tiempo como de las variables que intervienen en el proceso,

no se ven afectados por el paso de levitación de la tuerca a flotación. Por último, las técnicas de control a utilizar tampoco cambian con el nuevo sistema, ya que se siguen empleando los mismos esquemas de control.

A partir de aquí, todo lo demás son ventajas en el nuevo sistema. Como punto de partida, el flotador es un sistema estable por naturaleza, lo que simplifica en gran medida la obtención de los parámetros del modelo, utilizando las mismas técnicas que anteriormente, además de ser matemáticamente más manejable, como demostraremos en la siguiente sección. Adicionalmente, la comprobación visual de los resultados del control resulta mucho más sencilla e intuitiva. Estos son los aspectos clave e innovadores de cara al aprendizaje del alumno, ya que el nuevo sistema permite a los estudiantes identificar y relacionar de manera muy sencilla los elementos del sistema real con los conceptos estudiados en la asignatura.

4. Modelo matemático

En esta sección se discuten los modelos matemáticos de comportamiento del levitador y el flotador magnético, mostrando los aspectos que tienen en común y las principales diferencias que hacen del segundo un sistema con una mejor cualidad didáctica en el contexto de la asignatura.

El objetivo de ambos sistemas es el mismo, conseguir que una tuerca metálica, o un imán, alcance una distancia deseada (referencia de control) con respecto a un imán cuyo campo magnético es modificado mediante una bobina. La variable de control en ambos sistemas es la misma, la tensión que se alimenta a la bobina mediante un PWM, $u(t)$. Mediante cambios en la tensión, se modifica la intensidad de corriente que circula por la bobina de acuerdo a

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t), \quad (1)$$

donde L representa la inductancia de la bobina y R la resistencia asociada al circuito eléctrico. Variaciones en la intensidad, generan en ambos sistemas una fuerza magnética, $f(t)$, que es la que modifica la posición de la tuerca, $z(t)$.

Sin embargo, los puntos que ambos sistemas tienen en común terminan aquí. Mientras que en el caso del levitador, la fuerza que ejerce la bobina se puede expresar como

$$f(t) = k_0 \frac{(k_1 + i(t))^2}{z^2(t)}, \quad (2)$$

donde k_0 y k_1 son dos constantes del modelo que los estudiantes tienen que ajustar en base a medi-

das que realizan, en el caso del flotador esta ecuación es más sencilla y es razonablemente ajustable con un sólo parámetro,

$$f(t) = k_0 \frac{i^2(t)}{z^2(t)}, \quad (3)$$

desapareciendo la constante k_1 . Lógicamente el alumno ha de identificar en su sistema dichos parámetros para que el controlador calculado en base al modelo se ajuste después a su sistema. Esta simplificación se debe a la estabilidad natural que presenta el flotador. Si no circula corriente por la bobina, la tuerca alcanza una posición de equilibrio cuando la fuerza de repulsión entre los dos imanes es igual al peso de la tuerca, posición de reposo con todas las variables igual a cero.

Por otro lado, aplicando al segunda ley de Newton para considerar el equilibrio de fuerzas, en el flotador obtenemos

$$M \frac{dz(t)}{dt^2} = f(t) - Mg - k_2 \frac{dz(t)}{dt}, \quad (4)$$

con k_2 un coeficiente de rozamiento viscoso que también se tiene que ajustar de manera empírica. En el levitador, la ecuación de equilibrio de fuerzas queda de la siguiente manera:

$$M \frac{dz(t)}{dt^2} = Mg - f(t) \quad (5)$$

Linealizando la fuerza, eq. (2) y (3), en el punto al que queremos que nuestra tuerca se estabilice, obtenemos

$$f(t) \simeq k_i i(t) + k_z z(t), \quad (6)$$

donde ya se ha eliminado el punto de trabajo y $k_i > 0$ y $k_z < 0$ son las constantes obtenidas del proceso de linealización. Si sustituimos esta ecuación en (4) obtenemos una relación entre $z(t)$ e $i(t)$ de segundo orden estable, con una pareja de polos complejos y conjugados con parte real negativa. La misma sustitución en (5) da lugar a un modelo en el que se refleja la inestabilidad del sistema.

Por último, viendo de nuevo la Figura 2, la colocación del sensor Hall en la parte superior del tubo del flotador también simplifica el lazo de realimentación, ya que si $z(t)$ aumenta, también lo hace la tensión que mide el sensor, mientras que en el caso del levitador un aumento de $z(t)$ produce una disminución de la tensión, dando lugar a un signo -1 que todavía confunde más a los alumnos.

En resumen, el flotador es un sistema naturalmente estable que da lugar a un modelo matemáticamente más sencillo en el que resulta más fácil la identificación de los parámetros. Desde una perspectiva puramente didáctica, presenta ventajas

significativas a la hora de mostrar a los estudiantes la aplicación de diferentes técnicas de control sin por ello afectar a la parte relacionada con la electrónica de la asignatura.

5. Ejemplos de control del flotador magnético

En esta sección se ilustran resultados de algunos de los controladores que los alumnos deben plantear en el marco de la asignatura utilizando el flotador magnético. En concreto se plantea la utilización de dos controladores basados en espacio de estados. El primero es un esquema de control con pre-alimentación de consigna y estimación del estado, definido mediante altura, velocidad e intensidad. El segundo esquema de control está basado en el uso de integradores, un único integrador en este caso, también con estimación del estado. Los dos esquemas de control se muestran en la Figura 4, donde los bloques con L representan las leyes de control empleadas.

Al ser un sistema estable, el alumno ajusta las leyes de estimación y control en el propio sistema de una forma más sencilla. Otra ventaja del flotador es la posibilidad de modificar la referencia del sistema. En el caso del levitador, que es un sistema naturalmente inestable, era mucho más complicado. Esto permite ver en el osciloscopio (o en el monitor serie de Arduino) la respuesta transitoria del sistema sin necesidad de preocuparse por congelar la imagen en el instante adecuado. En nuestros experimentos, la referencia alterna entre valores de 0 y 4 milímetros con una frecuencia aproximada de medio Hercio.

La Figura 5 muestra los valores de la altura y de la tensión en la bobina para los dos esquemas de control planteados. En la primera fila de la figura se muestra la altura del imán, donde se observa que el esquema basado en integradores consigue subir los 4mm, mientras que el esquema de prealimentación, a causa del rozamiento seco, únicamente sube 2.5mm. La segunda fila muestra el valor de la tensión aplicada en la bobina, donde también se observa que la acción calculada por el esquema basado en integradores es más suave. Conviene notar que en ambos esquemas se ha utilizado la misma asignación de valores propios para el cálculo de las matrices con las leyes de control y de observación. De este experimento, los alumnos son capaces de observar las bondades y las limitaciones de dos esquemas de control más avanzados que el clásico PID, que también tienen que implementar en la asignatura.

Para concluir esta sección, la Figura 6 muestra los valores de las 3 variables estimadas por el ob-

servador en el esquema de control basado en pre-alimentación. Al ser capaces de variar la consigna, los alumnos también pueden observar diferencias en las otras variables de estado utilizando el flotador. Por ejemplo, se observan los picos en la variable velocidad cada vez que hay un cambio en la referencia y el imán se desplaza al nuevo punto deseado. En el caso de la altura del imán, los alumnos también comprueban la bondad del observador (o los posibles fallos) comparando la estimación de la altura con la medida (transformada a metros) que proporciona el sensor Hall, o comparando el valor estimado de la intensidad de la corriente que circula por la bobina con el valor que marca la fuente de alimentación.

6. Conclusiones

Este trabajo ha mostrado las ventajas potenciales que presenta la utilización de un flotador magnético como alternativa al uso de un levitador magnético en el ámbito de la docencia en control. Comparado con el levitador, se ha demostrado que el flotador presenta un modelo matemático ligeramente más sencillo, siendo además estable por naturaleza. Adicionalmente, el nuevo sistema no requiere modificaciones significativas en el diseño electrónico ni en la aplicación de las técnicas de control. De esta forma, a nivel didáctico se mejora la comprensión de los aspectos relevantes del control.

En el artículo se han mostrado también ejemplos de algunos de los controladores utilizados en la asignatura de Diseño electrónico y control avanzado integrada en el Master de Ingeniería Industrial, donde se puede observar el comportamiento del flotador con cambios en la referencia. Como trabajo futuro, se plantea realizar un análisis más detallado y sistemático del aprendizaje de los alumnos con esta metodología docente.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de innovación docente PIIDUZ_16-074 de la Universidad de Zaragoza.

Referencias

- [1] T. H. Wong. Design of a magnetic levitation control system. *IEEE Transactions on Education*, 29(4):196–200, Nov 1986.
- [2] G. S. Mason, T. R. Shuman, and K. E. Cook. Comparing the effectiveness of an inverted classroom to a traditional classroom in an upper-division engineering course. *IEEE Transactions on Education*, 56(4):430–435, November 2013.

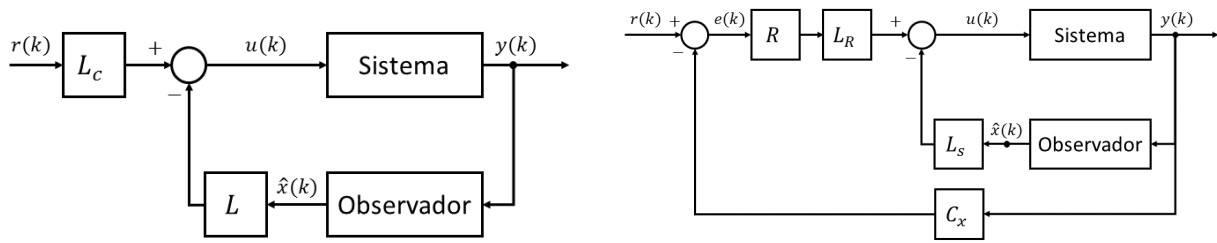


Figura 4: Esquemas de control empleados para probar el flotador.

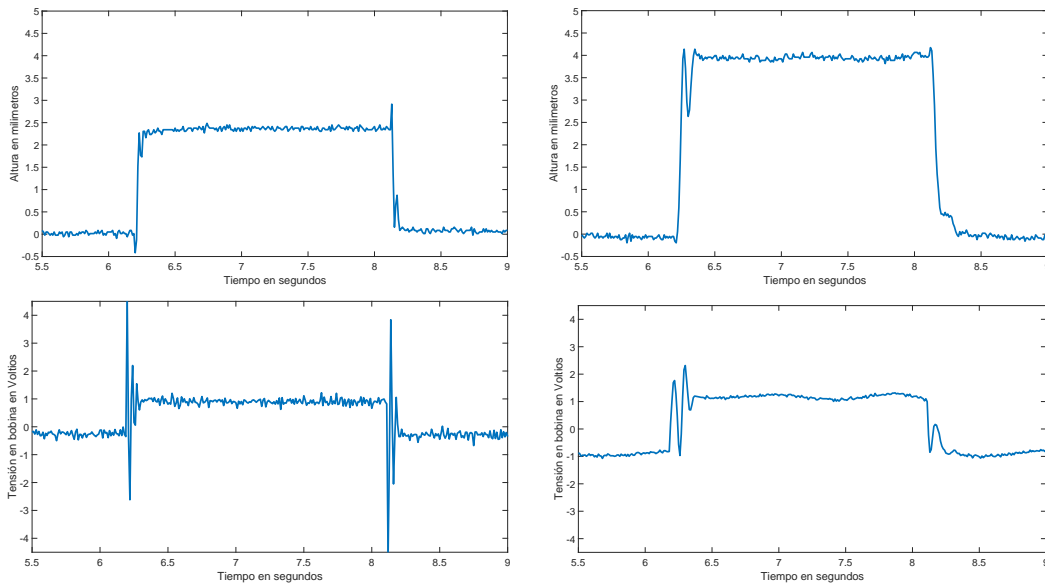


Figura 5: Evolución de la altura y la tensión aplicada a la bobina para el flotador y los dos esquemas de control de la Figura 4. En la primera fila se muestra la altura del imán, donde se observa que el esquema basado en integradores consigue subir los 4mm, mientras que el esquema de prealimentación, a causa del rozamiento seco, únicamente sube 2.5mm. La segunda fila muestra el valor de la tensión aplicada en la bobina.

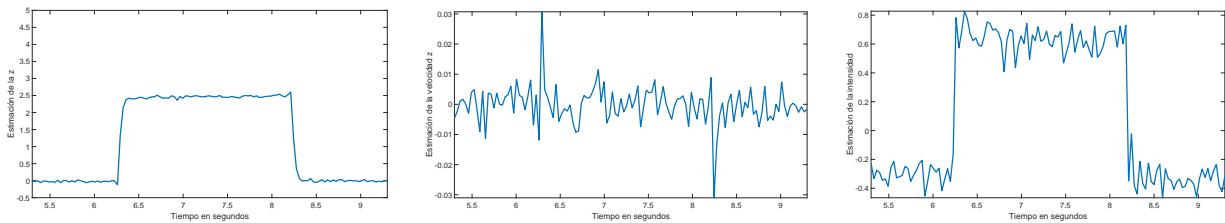


Figura 6: Estimación de las tres variables de estado para el esquema de control basado en prealimentación. De izquierda a derecha: altura, velocidad e intensidad.

- [3] L. Moreno, C. González, I. Castilla, E. González, and J. Sigut. Applying a constructivist and collaborative methodological approach in engineering education. *Elsevier Computers & Education*, 49(3):891–915, November 2007.
- [4] C. A. Jara, F. A. Candelas, S. T. Puente, and F. Torres. Hands-on experiences of undergraduates students in automatics and robotics using a virtual and remote laboratory. *Elsevier Computers & Education*, 57(4):2451–2461, December 2011.
- [5] Y. Zi-Jiang and T. Michitaka. Adaptive robust nonlinear control of a magnetic levitation system. *Automatica*, 37(7):1125–1131, July 2001.
- [6] V. S. Bandal and P. N. Vernekar. Design of a discrete-time sliding mode controller for a magnetic levitation system using multirate

- output feedback. In *American Control Conference*, pages 4289–4294, 2010.
- [7] V. A. Oliveira, E. F. Costa, and J. B. Vargas. Digital implementation of a magnetic suspension control system for laboratory experiments. *IEEE Transactions on Education*, 42(4):315–322, Nov 1999.
- [8] R. Galvao, T. Yoneyama, F. M. U. de Araujo, and R. G. Machado. A simple technique for identifying a linearized model for a didactic magnetic levitation system. *IEEE Transactions on Education*, 46(1):315–322, Feb 2003.
- [9] W. Yu and X. Li. A magnetic levitation system for advanced control education. In *International Congress of Federation of Automatic Control*, pages 9032–9037, 2014.
- [10] Guía docente de la asignatura de diseño electrónico y control avanzado. <http://titulaciones.unizar.es/guias16/index.php?asignatura=60805>. Accessed: 2017-05-30.

PROGRAMACIÓN ATRACTIVA DE PLC

Eduardo J. Moya de la Torre
ITAP, Universidad de Valladolid, 47011, Valladolid, edumoy@eii.uva.es

Alfonso Poncela, F. Javier García Ruiz
ITAP, Universidad de Valladolid, 47011, Valladolid [{poncela.javgar}@eii.uva.es](mailto:poncela.javgar@eii.uva.es)

Víctor del Barrio Lagándara, victor.barrio.lagandara@alumnos.uva.es

El objetivo de este artículo es presentar una nueva forma de transmitir los conocimientos en cuanto al manejo y programación de autómatas se refiere, utilizando para ello un software de simulación que nos permita comprobar en todo momento cual sería el resultado físico de las instrucciones programadas en el autómata. Se mostrará su funcionamiento con fines puramente didácticos.

Se recurre al diseño y programación de varias estaciones de trabajo que se asemejen en gran medida muchos de los procesos que se dan hoy en día a nivel industrial.

El equipo necesario para llevar a cabo esta tarea consta de una parte software compuesta por el programa de simulación (FACTORY I/O) y el programa para realizar la programación de las diferentes instrucciones del autómata (TIA PORTAL), así como de una parte hardware en la que se encuentran elementos como el ordenador con el que se realizará la programación de los diferentes elementos y se simulará la estación, un PLC encargado de gobernar el control de nuestras plantas virtuales y una pantalla HMI que nos permite monitorizar alguno de los procesos.

Palabras Clave: PLC, simulación, TIA PORTAL, FACTORY I/O, programación.

1 INTRODUCCIÓN

En el marco de las asignaturas de control que se imparten sobre todos en el Grado de Electrónica Industrial y Automática (GEIA) en la Universidad de Valladolid, se desea realizar un conjunto de prácticas que sirva como apoyo a otros equipos de prácticas, con un manejo simple y fácilmente transportable.

El creciente desarrollo de la automatización de procesos que se ha dado en estos últimos años hace que cada vez adquiera más relevancia por universidades e instituciones educativas la impartición de conocimientos asociados con la robótica, el control o la instrumentación.

El problema que se presenta en la mayoría de las

ocasiones es que este tipo de conocimientos poseen una gran carga matemática que hacen que la asimilación de conceptos sea un tanto compleja y abstracta, dificultando la interiorización de los mismos.

Por otro lado, la impartición de dichos conocimientos de manera individualizada muchas veces no permite ver la relación que existen entre ellos ya que al final unos se apoyan en las funciones de otros para poder trabajar.

Todos estos problemas se solucionan cuando el estudiante una vez finalizado sus estudios accede a un puesto de trabajo y ve en la realidad como en una máquina de un proceso industrial están todos los conceptos que había estudiado, pero sin obtener una visión global de los mismo.

Para los centros educativos proporcionar dichas oportunidades es casi imposible debido al elevado coste económico que poseen las máquinas a nivel industrial. Sin embargo, hoy en día existen softwares de simulación y de programación que aúnan gran parte de los conocimientos teóricos y que permiten visualizar como sería el comportamiento real de los mismos, tal y como si estuviéramos en una planta real, permitiendo al alumno obtener una visión global de la automatización de procesos.

El presente artículo se organiza de la siguiente manera: después de esta breve introducción, en la segunda sección se muestran los objetivos principales del trabajo, en la tercera sección se hace una descripción del software de simulación FACTORY I/O así como de sus principales características y librerías. En la cuarta sección se presentan los elementos necesarios para el desarrollo de las estaciones creadas en la aplicación. En la quinta sección se presentan cada una de las cuatro estaciones de trabajo creadas con su diseño, conexionado, funcionamiento y programación a partir de los elementos básicos. Finalmente, se ofrecen algunas de las principales conclusiones obtenidas para la utilización del equipo de prácticas en el Grado de Electrónica Industrial y Automática (GEIA) en la Universidad de Valladolid, y las referencias utilizadas.

2 INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente trabajo es la programación y simulación de cuatro procesos industriales en los que se manejarán tanto señales analógicas como digitales, se regularán procesos continuos mediante control PID además de monitorizar algunas acciones por pantalla HMI.

El hardware empleado es un ordenador personal, un autómatas S7-1200 de Siemens y una pantalla HMI KTP 700 BASIC PN de Siemens. Las herramientas de software son FACTORY I/O y TIA PORTAL.

Para la realización de los objetivos mencionados con anterioridad ha sido necesario:

- Diseñar y estudiar el comportamiento de los diferentes elementos que componen cada una de las estaciones, así como las señales de control de los mismos.
- Programar las instrucciones de control que gobernarán cada una de las estaciones acordes a los requisitos de funcionamiento.
- Realizar el conexionado del ordenador personal con el PLC y el HMI para crear una red local a través de la cual puedan comunicarse.
- Estudiar y analizar la documentación de FACTORY I/O para conocer cómo se realiza la comunicación con diferentes elementos tanto de tipo software como hardware.
- Investigar sobre la correcta configuración del hardware de la CPU del autómatas para que pueda comunicarse con FACTORY I/O.
- Implementar la comunicación entre FACTORY I/O y el software de simulación de PLCSIM para poder visualizar el comportamiento de las estaciones sin necesidad de disponer de un PLC.
- Programar el algoritmo de control de lazo cerrado PID para controlar el proceso continuo.
- Configurar la pantalla HMI para que se comunique con el PLC y que responda a las órdenes dadas por el operario de control de planta

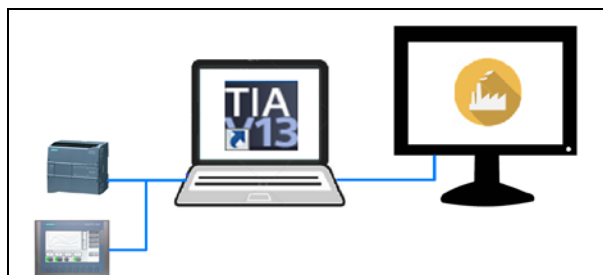


Figura 1: Elementos necesarios

3 ELEMENTOS NECESARIOS

Los elementos necesarios para realizar este trabajo son, Figura 1:

- Software de programación de PLC y HMI
- Software de simulación Factory I/O
- PLC 1200 de SIEMENS
- Cámara de órbita
- HMI
- Ordenador con pantalla externa
- Cableado para establecer todas las comunicaciones.

4 METODOLOGÍA

A continuación, presentamos los pasos que se han seguido en todos los casos realizados

4.1 INTRODUCCIÓN

El uso de FACTORY I/O nos permite realizar de forma sencilla simulaciones de fábricas en 3D para el aprendizaje de tecnologías de automatización. Permite construir rápidamente una fábrica virtual utilizando una selección de piezas industriales comunes.

Por otro lado, incluye muchas escenas inspiradas en aplicaciones industriales típicas de diferente nivel de dificultad.

El escenario más común es usar el software como una plataforma de entrenamiento de PLC ya que son los controladores más comunes que se encuentran en aplicaciones industriales. Sin embargo, este programa también ofrece la posibilidad de utilizar microcontroladores, SoftPLC, Modbus, entre otras muchas tecnologías.

4.2 NAVEGACIÓN

Se dispone de varias cámaras virtuales que nos permiten navegar en el espacio 3D y son clave para interactuar con las diferentes partes. Las cámaras son de tres tipos diferentes y cada una fue diseñada para un propósito funcional específico. Estos tres tipos de cámaras son:

- Cámara de órbita
- Cámara Fly
- Cámara de primera persona

4.3 CONTROL CON PLC

El control de la escena mediante el uso de un PLC se realiza a través de los controladores de Entrada/Salida que incorpora FACTORY I/O, el cual proporciona una lista de escenas para usar inspiradas en aplicaciones industriales de diferente nivel de dificultad

FACTORY I/O incluye muchos controladores de E/S, cada uno para una tecnología específica. Para el caso de este trabajo se han adquirido la licencia de controladores de la marca SIEMENS.

Configurando adecuadamente dicho controlador, este sabrá leer y escribir Entradas/Salidas desde el mismo.

En la Figura 2, se muestra un esquema de la configuración general de comunicación entre FACTORY I/O y TIA

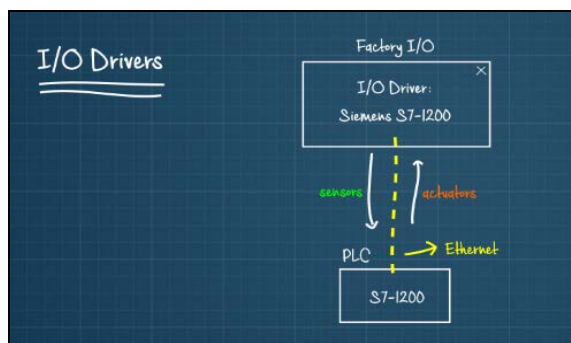


Figura 2: Configuración

4.4. Componentes

Se incluye una colección de piezas basadas en el equipo industrial más común. Hay más de 80 partes, organizadas en ocho categorías: artículos, piezas de carga pesada, partes de carga ligera, sensores, operadores, estaciones, dispositivos de aviso y pasarelas, como se ve en la Figura 4.



Figura 3: Componentes

5 ESTACIONES DE TRABAJO

En este apartado se pasa a presentar cada una de las estaciones de trabajo diseñadas y programadas para cumplir ciertos requisitos de funcionamiento.

Para ello se van a presentar las siguientes estaciones:

- Estación paletizadora, Figura 4.
- Estación distribuidora, Figura 7.
- Estación depósito-líquido, Figura 11.
- Estación gestión almacén stock, Figura 16

Y para cada estación vamos a seguir el mismo esquema general de presentación, el cual consta de:

- Descripción del funcionamiento
- Conexión de E/S
- Programación del autómat

5.1 Estación paletizadora

5.1.1 Descripción funcionamiento

En esta estación se realizó la automatización de un proceso de paletizado en el que una serie de cajas son distribuidas de una determinada forma sobre un palé.

La estación consta de una cinta transportadora por donde llegan las cajas que deben ser posicionadas sobre el palé. Al final de la misma, se encuentra un pistón cuya función es posicionar de forma adecuada la caja para que pueda ser accesible por el robot cartesiano.

También hay una cinta de rodillos a través de la cual se van desplazando los palés, en mitad de la cinta se encuentra un rodillo de parada que sirve para impedir el avance del palé cuando ya se encuentra en la posición adecuada.

El elemento que es encargado de llevar a cabo todo el proceso de paletizado de cajas es un robot cartesiano. El robot distribuirá 6 cajas sobre cada palé, de tal forma que, dependiendo del número de caja, el robot se situará sobre unas posiciones u otras.

Cuando un palé está completo se vuelve a poner en marcha la cinta de rodillos, desplazando el palé que ya se encuentra ocupado por cajas hacia el final de la cinta, al mismo tiempo que otro nuevo palé se coloca en la posición correspondiente para ser cargado por cajas.

Para gobernar el comportamiento de la estación por parte del operario se dispone de un cuadro de mando con los siguientes elementos:

- Botón de marcha
- Botón de paro
- Botón de parada de emergencia



Figura 4: Estación Paletizadora

5.1.2 Conexionado de entradas/salidas

Las entradas y salidas utilizadas para realizar el programa en TIA PORTAL son las mismas que las utilizadas en la configuración de la estación en FACTORY I/O ya que, si no se realiza de esta forma, no existe una correcta comunicación entre el autómatas y el modelo de simulación.

A continuación, se muestra en una tabla las entradas y salidas utilizadas en la elaboración del programa en TIA PORTAL y como se muestran esas conexiones en el PLC virtual de FACTORY I/O, Figura 5.

SENORES	Input 120 ADDRESS	ACTUADORES
EMERGENCIA	PIB.0	00.0
Sensor Posición X	PIB.1	00.1
Sensor Posición Y	PIB.2	00.2
Sensor Posición X (V)	PIB.3	00.3
Sensor Posición Y (V)	PIB.4	00.4
FACTORY I/O (Main)	PIB.5	00.5
FACTORY I/O (Main)	PIB.6	00.6
FACTORY I/O (Main)	PIB.7	00.7
FACTORY I/O (Main)	PIB.8	00.8
FACTORY I/O (Main)	PIB.9	00.9
FACTORY I/O (Main)	PIB.10	00.10
FACTORY I/O (Main)	PIB.11	00.11
FACTORY I/O (Main)	PIB.12	00.12
FACTORY I/O (Main)	PIB.13	00.13
FACTORY I/O (Main)	PIB.14	00.14
FACTORY I/O (Main)	PIB.15	00.15
FACTORY I/O (Main)	PIB.16	00.16
FACTORY I/O (Main)	PIB.17	00.17
FACTORY I/O (Main)	PIB.18	00.18
FACTORY I/O (Main)	PIB.19	00.19
FACTORY I/O (Main)	PIB.20	00.20
FACTORY I/O (Main)	PIB.21	00.21
FACTORY I/O (Main)	PIB.22	00.22
FACTORY I/O (Main)	PIB.23	00.23
FACTORY I/O (Main)	PIB.24	00.24
FACTORY I/O (Main)	PIB.25	00.25
FACTORY I/O (Main)	PIB.26	00.26
FACTORY I/O (Main)	PIB.27	00.27
FACTORY I/O (Main)	PIB.28	00.28
FACTORY I/O (Main)	PIB.29	00.29
FACTORY I/O (Main)	PIB.30	00.30
FACTORY I/O (Main)	PIB.31	00.31
FACTORY I/O (Main)	PIB.32	00.32
FACTORY I/O (Main)	PIB.33	00.33
FACTORY I/O (Main)	PIB.34	00.34
FACTORY I/O (Main)	PIB.35	00.35
FACTORY I/O (Main)	PIB.36	00.36
FACTORY I/O (Main)	PIB.37	00.37
FACTORY I/O (Main)	PIB.38	00.38
FACTORY I/O (Main)	PIB.39	00.39
FACTORY I/O (Main)	PIB.40	00.40
FACTORY I/O (Main)	PIB.41	00.41
FACTORY I/O (Main)	PIB.42	00.42
FACTORY I/O (Main)	PIB.43	00.43
FACTORY I/O (Main)	PIB.44	00.44
FACTORY I/O (Main)	PIB.45	00.45
FACTORY I/O (Main)	PIB.46	00.46
FACTORY I/O (Main)	PIB.47	00.47
FACTORY I/O (Main)	PIB.48	00.48
FACTORY I/O (Main)	PIB.49	00.49
FACTORY I/O (Main)	PIB.50	00.50
FACTORY I/O (Main)	PIB.51	00.51
FACTORY I/O (Main)	PIB.52	00.52
FACTORY I/O (Main)	PIB.53	00.53
FACTORY I/O (Main)	PIB.54	00.54
FACTORY I/O (Main)	PIB.55	00.55
FACTORY I/O (Main)	PIB.56	00.56
FACTORY I/O (Main)	PIB.57	00.57
FACTORY I/O (Main)	PIB.58	00.58
FACTORY I/O (Main)	PIB.59	00.59
FACTORY I/O (Main)	PIB.60	00.60
FACTORY I/O (Main)	PIB.61	00.61
FACTORY I/O (Main)	PIB.62	00.62
FACTORY I/O (Main)	PIB.63	00.63
FACTORY I/O (Main)	PIB.64	00.64
FACTORY I/O (Main)	PIB.65	00.65
FACTORY I/O (Main)	PIB.66	00.66
FACTORY I/O (Main)	PIB.67	00.67
FACTORY I/O (Main)	PIB.68	00.68
FACTORY I/O (Main)	PIB.69	00.69
FACTORY I/O (Main)	PIB.70	00.70
FACTORY I/O (Main)	PIB.71	00.71
FACTORY I/O (Main)	PIB.72	00.72
FACTORY I/O (Main)	PIB.73	00.73
FACTORY I/O (Main)	PIB.74	00.74
FACTORY I/O (Main)	PIB.75	00.75
FACTORY I/O (Main)	PIB.76	00.76
FACTORY I/O (Main)	PIB.77	00.77
FACTORY I/O (Main)	PIB.78	00.78
FACTORY I/O (Main)	PIB.79	00.79
FACTORY I/O (Main)	PIB.80	00.80
FACTORY I/O (Main)	PIB.81	00.81
FACTORY I/O (Main)	PIB.82	00.82
FACTORY I/O (Main)	PIB.83	00.83
FACTORY I/O (Main)	PIB.84	00.84
FACTORY I/O (Main)	PIB.85	00.85
FACTORY I/O (Main)	PIB.86	00.86
FACTORY I/O (Main)	PIB.87	00.87
FACTORY I/O (Main)	PIB.88	00.88
FACTORY I/O (Main)	PIB.89	00.89
FACTORY I/O (Main)	PIB.90	00.90
FACTORY I/O (Main)	PIB.91	00.91
FACTORY I/O (Main)	PIB.92	00.92
FACTORY I/O (Main)	PIB.93	00.93
FACTORY I/O (Main)	PIB.94	00.94
FACTORY I/O (Main)	PIB.95	00.95
FACTORY I/O (Main)	PIB.96	00.96
FACTORY I/O (Main)	PIB.97	00.97
FACTORY I/O (Main)	PIB.98	00.98
FACTORY I/O (Main)	PIB.99	00.99
FACTORY I/O (Main)	PIB.100	00.100

Figura 5: Distribución E/S estación paletizadora

5.1.3 Programación del autómatas

La programación del autómatas se realiza mediante la utilización del lenguaje de contactos o KOP, adquiriendo la siguiente estructura general del programa, Figura 6.

5.2 Estación distribuidora

5.2.1 Descripción funcionamiento

En esta estación se automatiza de un proceso en el cual dos tipos diferentes de piezas son distribuidas y almacenadas en cajas de cuatro unidades cada una para su posterior transporte.

A ambos lados del clasificador se encuentran dos líneas distribuidoras de producto independientes una de la otra.

Al inicio del proceso se encuentra una cinta transportadora sobre la cual llegan diferentes tipos de piezas. Al final de la misma hay un clasificador de ruedas, al que se le ha incorporado un sensor de visión artificial, de tal forma que si el sensor detecta que la pieza es de un tipo determinado, activa el clasificador desplazando la pieza situada sobre él hacia un lado u otro del mismo.



Figura 6: Bloques estación paletizadora

Al final de cada línea se encuentra una barrera de parada que detiene el desplazamiento de la pieza, colocándola en la posición adecuada para que posteriormente pueda ser alcanzada por el robot.

Cada robot tiene asociado otra cinta transportadora sobre la cual aparecerán las cajas en las que se van a almacenar hasta cuatro unidades de piezas de cada tipo. Cuando una caja se ha completado con cuatro piezas del mismo tipo, se desplaza hasta el final de la línea, volviendo otra caja vacía a ocupar la posición abandonada por la caja anterior para ser nuevamente ocupada por piezas.

Para gobernar el comportamiento de la estación se dispone de un cuadro de mando con los siguientes elementos:

- Botón de marcha
- Botón de paro
- Botón de parada de emergencia
- Botón de reset de contadores de piezas



Figura 7: Estación distribuidora

5.2.2 Conexión de entradas/salidas

A continuación, se muestra en una tabla las entradas y salidas utilizadas en la elaboración del programa en TIA PORTAL y como se muestran esas conexiones en el PLC virtual de FACTORY I/O.

SENORES		PLC 1212C AC/DC/RLY		ACTUADORES	
señal de arranque	DI1.1	01.0	Q1.0	Embrague motorbomba	Actuador robot wds
señal de parada	DI1.2	01.1	Q1.1	Stop emergencia	Actuador robot wds
señal de emergencia	DI1.3	01.2	Q1.2	Señal de parada	Actuador robot wds
señal de alarma	DI1.4	01.3	Q1.3	Cinta parada	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.5	01.4	Q1.4	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.6	01.5	Q1.5	Cinta parada wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.7	01.6	Q1.6	Cinta parada wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.8	01.7	Q1.7	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.9	01.8	Q1.8	Cinta parada wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.10	01.9	Q1.9	Cinta parada wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.11	01.10	Q1.10	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.12	01.11	Q1.11	Cinta parada wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.13	01.12	Q1.12	Cinta parada wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.14	01.13	Q1.13	Cinta parada wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.15	01.14	Q1.14	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.16	01.15	Q1.15	Cinta parada wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.17	01.16	Q1.16	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.18	01.17	Q1.17	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.19	01.18	Q1.18	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.20	01.19	Q1.19	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.21	01.20	Q1.20	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.22	01.21	Q1.21	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.23	01.22	Q1.22	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.24	01.23	Q1.23	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.25	01.24	Q1.24	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.26	01.25	Q1.25	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.27	01.26	Q1.26	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.28	01.27	Q1.27	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.29	01.28	Q1.28	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.30	01.29	Q1.29	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.31	01.30	Q1.30	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.32	01.31	Q1.31	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.33	01.32	Q1.32	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.34	01.33	Q1.33	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.35	01.34	Q1.34	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.36	01.35	Q1.35	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.37	01.36	Q1.36	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.38	01.37	Q1.37	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.39	01.38	Q1.38	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.40	01.39	Q1.39	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.41	01.40	Q1.40	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.42	01.41	Q1.41	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.43	01.42	Q1.42	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.44	01.43	Q1.43	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.45	01.44	Q1.44	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.46	01.45	Q1.45	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.47	01.46	Q1.46	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.48	01.47	Q1.47	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.49	01.48	Q1.48	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.50	01.49	Q1.49	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.51	01.50	Q1.50	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.52	01.51	Q1.51	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.53	01.52	Q1.52	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.54	01.53	Q1.53	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.55	01.54	Q1.54	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.56	01.55	Q1.55	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.57	01.56	Q1.56	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.58	01.57	Q1.57	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.59	01.58	Q1.58	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.60	01.59	Q1.59	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.61	01.60	Q1.60	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.62	01.61	Q1.61	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.63	01.62	Q1.62	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.64	01.63	Q1.63	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.65	01.64	Q1.64	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.66	01.65	Q1.65	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.67	01.66	Q1.66	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.68	01.67	Q1.67	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.69	01.68	Q1.68	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.70	01.69	Q1.69	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.71	01.70	Q1.70	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.72	01.71	Q1.71	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.73	01.72	Q1.72	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.74	01.73	Q1.73	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.75	01.74	Q1.74	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.76	01.75	Q1.75	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.77	01.76	Q1.76	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.78	01.77	Q1.77	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.79	01.78	Q1.78	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.80	01.79	Q1.79	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.81	01.80	Q1.80	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.82	01.81	Q1.81	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.83	01.82	Q1.82	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.84	01.83	Q1.83	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.85	01.84	Q1.84	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.86	01.85	Q1.85	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.87	01.86	Q1.86	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.88	01.87	Q1.87	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.89	01.88	Q1.88	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.90	01.89	Q1.89	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.91	01.90	Q1.90	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.92	01.91	Q1.91	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.93	01.92	Q1.92	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.94	01.93	Q1.93	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.95	01.94	Q1.94	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.96	01.95	Q1.95	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.97	01.96	Q1.96	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.98	01.97	Q1.97	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.99	01.98	Q1.98	Factor stop wds	Cinta parada wds
señal de alarma	DI1.100	01.99	Q1.99	Factor stop wds	Cinta parada wds

Figura 8: Distribución E/S estación distribidora

5.2.3 Programación del autómat

La programación del autómat se realiza mediante la utilización del lenguaje de contactos o KOP, adquiriendo la siguiente estructura general del programa.

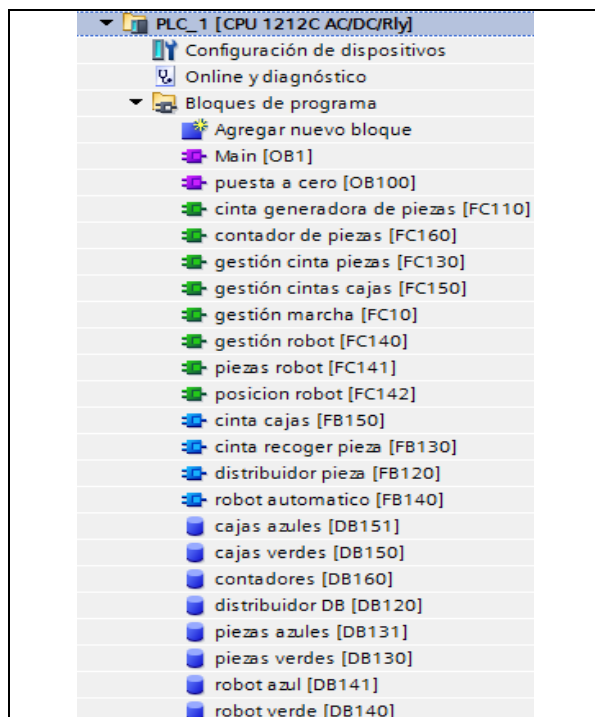


Figura 9: Bloques estación distribidora

5.3 Estación depósito líquido

5.3.1 Descripción funcionamiento

En este caso se trata de controlar un proceso continuo que consiste en el llenado y vaciado de un depósito

mediante una serie de válvulas.

La estación consta de un depósito de líquido que posee dos válvulas diferentes, una para realizar el llenado del mismo, y otra para vaciarlo. Junto a este depósito se encuentra un cuadro de mando desde el cual el operario puede seleccionar una cantidad determinada de líquido mediante el uso de un potenciómetro y añadirla al depósito o extraerla.

A su vez se han incorporado dos display encargados de informar al operario de la cantidad de litros seleccionados y la cantidad de litros que contiene el depósito en su interior.

Cada válvula del depósito posee su propio controlador PID ya que son elementos independientes uno del otro, Figura 10

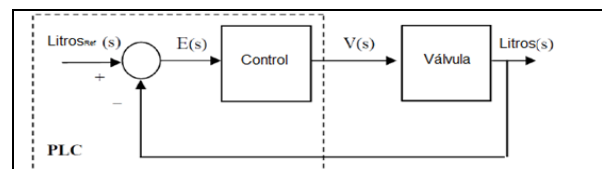


Figura 10: Esquema control PID válvula depósito

En el esquema, $E(s)$ representa la señal de error y es la diferencia entre los litros deseados en el depósito (referencia) y los litros realmente contenidos en su interior. La zona marcada con línea discontinua representa el autómat programable (S7-1200), en el que se encuentran los sistemas de control (PID) y desde el que se generan las señales de referencia.



Figura 11. Estación depósito líquido

5.3.2 Conexión de entradas/salidas

A continuación, se muestra en una tabla las entradas y salidas utilizadas en la elaboración del programa en TIA PORTAL y como se muestran esas conexiones en el PLC virtual de FACTORY I/O.



Figura 12: Distribución E/S estación depósito líquido

5.3.3 Programación del autómata

La programación del autómata se realiza mediante la utilización del lenguaje de contactos o KOP, adquiriendo la siguiente estructura general del programa.

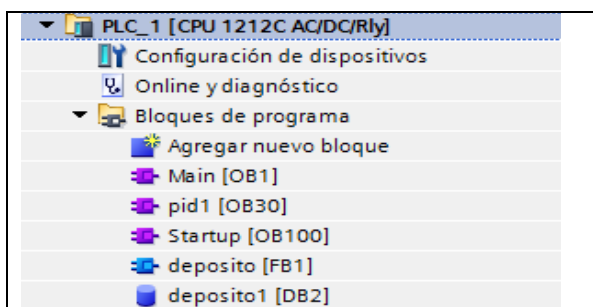


Figura 13: Bloques estación depósito líquido

Para la programación del control PID se utiliza el bloque PID_COMPACT proporcionado por TIA PORTAL configurándolo adecuadamente para que las características de respuesta se adecuen a las exigencias de nuestro sistema.

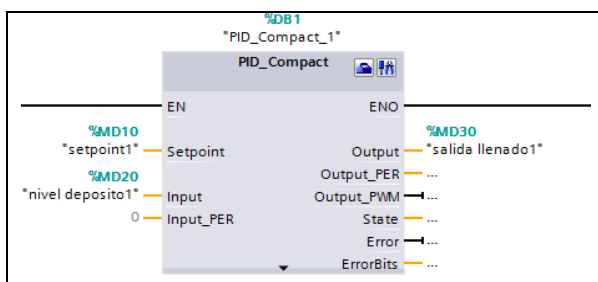


Figura 14: Bloque PID_COMPACT

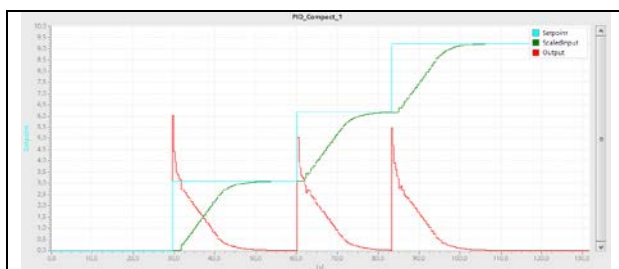


Figura 15: Visualización comportamiento PID

5.4 Estación gestión de stock almacén

5.4.1 Descripción funcionamiento

Con esta estación se pretende automatizar el stock de un almacén y controlar su gestión mediante una pantalla HMI manipulada por parte del operario.

El funcionamiento básico de la estación consiste en que por una cinta transportadora de rodillos llegan diferentes tipos de piezas en palé. Al final de esta cinta transportadora se encuentra una cámara de visión artificial que nos permite diferenciar un tipo de piezas u otras en función de su color y forma.

Una vez que la pieza ha sido reconocida y el palé se encuentra en la posición adecuada, el carro repartidor de la estación desplazará el palé con la pieza al lugar asociado del almacén, en función del tipo de pieza.

Cuando el palé con la pieza es retirado de la cinta transportadora de entrada, otro nuevo palé con otra pieza se desplazará a dicha posición para ser también almacenado.

Quando el carro repartidor ha depositado el palé con la pieza en la posición correspondiente del almacén, vuelve a la posición de inicio para volver a repetir el proceso con otro nuevo palé.

Por otro lado, el operario va a disponer de una pantalla HMI para controlar la gestión del almacén. En dicha pantalla, en la imagen principal, se disponen de dos botones uno de MARCHA y otro de PARO para controlar el funcionamiento de la estación. Además, el operario dispone de la opción de seleccionar el tipo de gestión que quiere realizar con los productos que se van almacenando en el almacén. Si prefiere adoptar una gestión de stock tipo FIFO (First Input First Output) o a su vez prefiere una gestión tipo LIFO (Last Input First Output).

En esa misma pantalla el operario dispone a su disposición de un botón que le permite acceder a otra nueva pantalla donde puede seleccionar el tipo de pieza deseada y ver toda su información asociada. Entre esa información se encuentra el número de piezas de ese tipo que hay en stock y el tiempo que llevan en el almacén. Es aquí donde el operario decide si desea extraer algunas de las piezas de ese tipo que se encuentran es stock.

Quando el operario decide extraer alguna pieza del stock, el carro repartidor de la estación se dirige a la fila del tipo de pieza seleccionada y en función del tipo de gestión (FIFO/LIFO), empezará a extraer piezas en una posición un otra de la fila.

Una vez la pieza ha sido extraída y depositada en el

carro repartidor, este se dirige a la cinta transportadora de salida donde será depositado el palé y finalmente abandonará la estación.

Cuando el carro repartidor haya terminado de extraer todas las piezas solicitadas por el operario, volverá a reanudar su trabajo colocando los nuevos palés que le van llegando por la cinta transportadora de entrada.



Figura 16: Estación gestión de stock almacén

5.4.2 Conexionado de entradas/salidas

A continuación, se muestra en una tabla las entradas y salidas utilizadas en la elaboración del programa en TIA PORTAL y como se muestran esas conexiones en el PLC virtual de FACTORY I/O.

SENSORES			ACTUADORES
FACTORY I/O (Power)	Sensores de entrada	Q5.4	Rotación de entrada
FACTORY I/O (Power)	Sensores de salida	Q5.5	Rotación de salida
FACTORY I/O (Power)	Sensores de entrada de carga	Q5.6	Rotación de carga
FACTORY I/O (Power)	Sensores de salida de carga	Q5.7	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.8	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.9	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.10	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.11	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.12	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.13	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.14	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.15	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.16	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.17	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.18	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.19	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.20	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.21	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.22	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.23	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.24	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.25	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.26	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.27	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.28	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.29	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.30	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.31	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.32	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.33	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.34	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.35	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.36	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.37	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.38	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.39	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.40	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.41	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.42	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.43	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.44	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.45	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.46	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.47	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.48	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.49	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.50	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.51	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.52	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.53	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.54	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.55	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.56	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.57	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.58	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.59	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.60	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.61	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.62	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.63	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.64	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.65	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.66	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.67	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.68	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.69	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.70	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.71	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.72	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.73	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.74	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.75	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.76	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.77	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.78	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.79	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.80	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.81	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.82	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.83	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.84	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.85	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.86	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.87	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.88	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.89	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.90	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.91	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.92	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.93	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.94	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.95	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.96	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.97	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.98	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.99	Rotación de salida de carga
Sensores de entrada de carga	Sensores de salida de carga	Q5.100	Rotación de salida de carga

Figura 17 Distribución E/S estación gestión stock

5.4.3 Programación del autómatas

Como siempre la programación del autómatas se realiza mediante la utilización del lenguaje de contactos o KOP, Figura 18. Lo nuevo que aporta esta estación es una pantalla HMI, Figura 20.

5.4.4 Programación del HMI

La programación del HMI se realiza mediante la utilización de imágenes a las cuales se las van agregando diferentes tipos de objetos con unas propiedades específicas, estos objetos pueden realizar ciertas acciones sobre las variables del PLC o sobre las propias variables del HMI. La estructura general de las imágenes del HMI es la que se muestra a continuación:

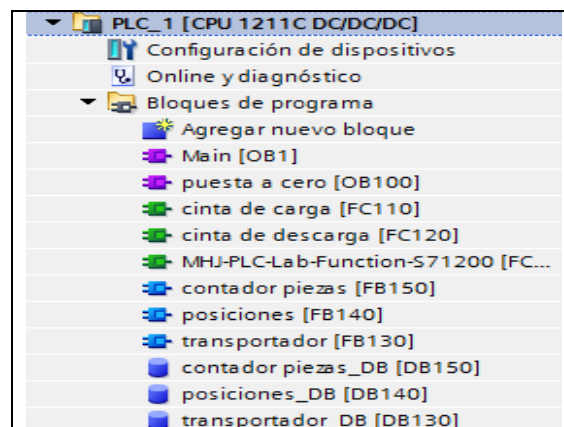


Figura 18: Bloques gestión stock almacén

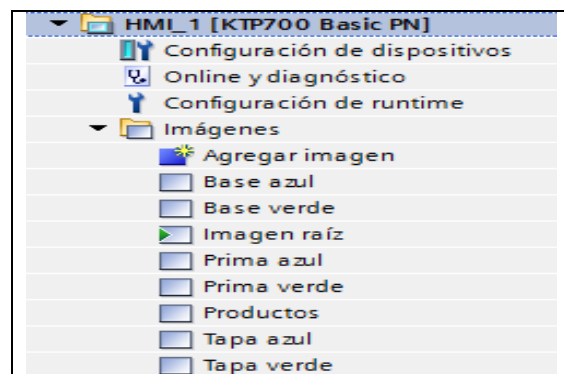


Figura 19: Bloques HMI

Siendo las siguientes algunas de las imágenes con las que trabaja el operario:



Figura 20: Gestión stock almacén

6 CONCLUSIONES

Tras la finalización de la programación y la simulación de las diferentes estaciones presentadas anteriormente y observando los resultados obtenidos podemos establecer que el uso del software FACTORY I/O facilita claramente la adquisición de nuevos conceptos en cuanto a materia de programación de PLC se refiere.

En las estaciones anteriores, a la hora de realizar su programación no se abordaba directamente la programación completa de la misma, sino que se iban dividiendo en secciones y programando poco a poco.

Cada vez que se tenía una sección programada, se simulaba para ver su comportamiento, lo que en muchos casos permite darse cuenta de la existencia de errores de programación que de otra forma hubieran pasados desapercibidos y sería a la hora de poner en marcha la estación completa cuando hubieran aparecido y siendo mucho más complicado dar con ellos y tratar de corregirlos.

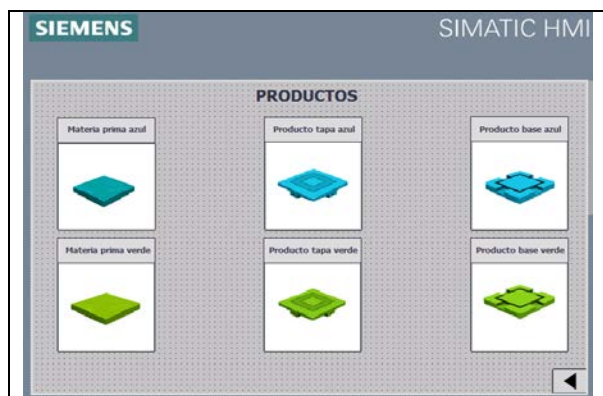


Figura 21: Imagen productos HMI

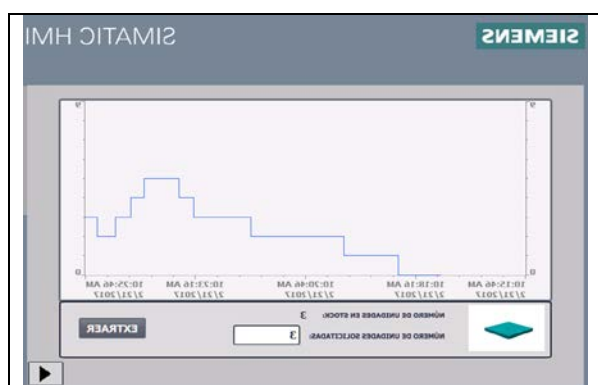


Figura 22: Registro Histórico

Por otro lado, el uso del PLC físico en todas aquellas estaciones cuya simulación se ha realizado mediante el uso del mismo, permite reforzar los conocimientos en el campo de redes de comunicación ya que es necesaria la creación de una red local para la correcta simulación de la estación.

A sí mismo, en el caso concreto del control del depósito del tanque, el uso del elemento de simulación proporcionado por FACTORY I/O permite observar el efecto que tiene sobre dicho elemento físico las diferentes estrategias de control, de otro modo hubiera sido necesario la existencia de un sistema físico con su respectivo coste y mantenimiento para poder observar los resultados.

También se ha observado que se obtienen ventajas en cuanto al uso y la programación de pantallas HMI ya que por un lado nos permite apreciar el efecto inmediato que tiene sobre la estación la activación de algún botón o elemento de la pantalla y por otro lado

nos permite hacer uso de elementos proporcionados para la programación de dichas pantallas como el uso de gráficas para monitorizar el comportamiento de ciertos procesos, el uso de avisos de sistema en caso de que se produzca algún error en la estación o el uso de recetas para cambiar ciertas variables del proceso, que de otro modo hubieran sido muy complicados de simular.

Por lo tanto, el software FACTORY I/O es un elemento más que recomendable tanto para todos aquellos que se estén iniciando en el mundo de la automatización industrial como para todas aquellas instituciones que se dediquen a la enseñanza de dicha materia.

Se han diseñado una serie de prácticas adecuadas para la docencia de la asignatura de regulación automática en la Escuela de Ingenieros Industriales de la Universidad de Valladolid.

Referencias

- [1] Controlador S7-1200 manual de sistema.:<https://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/Documents/S71200-MANUAL%20DEL%20SISTEMA.PDF> (último acceso 17/05/2017)
- [2] Programar en STEP 7: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/056/18652056/att_70833/v1/S7prv54_s.pdf. (último acceso 17/05/2017)
- [3] Simatic Step 7 en TIA PORTAL: https://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/Tia-Portal/tia_portal/Documents/Folleto%20STEP7%20en%20TIAP%20Nov11.pdf (último acceso 17/05/2017)
- [4] Manual de sistema WINCC BASIC v13.0: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/840/91379840/att_110005/v1/WinCC_Basic_V13_esES-es-ES.pdf (último acceso 17/05/2017)
- [5] Control PDI con PID_COMPACT: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/401/100746401/att_15889/v1/100746401_s7-1200_pid_compact_doku_v1d0_en.pdf (último acceso 17/05/2017)
- [6] Manual de instalación de software FACTORY I/O: <https://factoryio.com/docs/installing/> (último acceso 17/05/2017)
- [7] Configuración de drivers de FACTORY I/O para la gama S7-1200/1500 <https://factoryio.com/docs/manual/drivers/s7-1200-1500/> (último acceso 17/05/2017)
- [8] Diseño de elementos de simulación de FACTORY I/O <https://factoryio.com/docs/manual/parts/> (último acceso 17/05/2017)

MODERNIZACIÓN DE EQUIPO FEEDBACK MS-150 PARA EL APRENDIZAJE ACTIVO EN INGENIERÍA DE CONTROL

Perfecto Reguera Acevedo
Universidad de León, diepra@unileon.es

Miguel Ángel Prada Medrano
Universidad de León, mapram@unileon.es

Antonio Morán Álvarez
Universidad de León, a.moran@unileon.es

Juan José Fuertes Martínez
Universidad de León, diejfu@unileon.es

Manuel Domínguez González
Universidad de León, diemdg@unileon.es

Serafín Alonso Castro
Universidad de León, saloc@unileon.es

Resumen

En este artículo se presenta el desarrollo e integración de elementos hardware para construir un sistema de adquisición de datos que permite modernizar el equipo didáctico Feedback MS-150 con el fin de ampliar su tiempo de vida y aumentar el alcance de los conceptos de control que se pueden explicar con él. El sistema de adquisición no supera los 100€.

Palabras Clave: adquisición de datos, arduino, simulink, I2C, Feedback MS-150.

1 INTRODUCCIÓN

En el campo de la enseñanza de control, durante los últimos años, se ha prestado gran interés a diseñar, implementar y utilizar estructuras tecnológicas (laboratorios remotos) que permitan el acceso, vía internet, a equipos remotos con el fin de que los alumnos puedan realizar ensayos y prácticas no presenciales [4].

En la Universidad de León, dentro de los equipos remotos que se ofrecen a los alumnos para utilizarlos, disponemos de un equipo Feedback MS-150. Este equipo es muy popular en todas las universidades del país por su robustez, flexibilidad y la calidad pedagógica de las prácticas que con él se pueden plantear.

Aunque los laboratorios remotos presentan grandes ventajas [5], hay que tener en cuenta que ofrecer acceso remoto a un equipo supone hipotecar el uso de dicho equipo para que sólo se haga de forma "no presencial" y además no hay que desdeñar lo que es la práctica presencial, en la que el alumno manipula (realiza cableado), toca, ve y realiza el trabajo directamente, sin intermediarios. La "presencia" supone un *plus* en su educación difícil de ser sustituido.

Cuando, como docentes, intentamos acercar a los alumnos del primer curso de ingeniería de control los conceptos de regulador, acción de control, sistema, captador, actuador, ...; el alumno debe poder "sentirlos", "verlos", "tocarlos". **Es en este curso introductorio donde hay que hacer más hincapié en las prácticas de tipo presencial.** Las prácticas en laboratorio (aprender con lo que se hace) contribuyen al aprendizaje activo de los alumnos puesto que hacen uso de algunos de los 7 principios de buenas prácticas en educación [1][2]:

1. Comunicación bidireccional alumno-docente. La posibilidad de que los alumnos puedan recurrir a alguien cuando se "atasquen", que el docente aclare un poco el bosque o centre los objetivos es de gran valor educativo para los alumnos.
2. Reciprocidad y cooperación entre estudiantes. Buen aprendizaje es un esfuerzo colaborativo y social, no competitivo ni aislado [6]. Las prácticas en grupo de no

más de 3 personas son una herramienta muy útil.

3. Aprendizaje activo. Las personas recuerdan sólo el 20% de lo que oyen y el 90% de lo que dicen y hacen por sí mismos [3].
4. Retroalimentación inmediata. Los alumnos deben ser capaces de conocer lo que saben y lo que no saben para que puedan focalizar sus esfuerzos en la dirección adecuada. Las prácticas constituyen una forma de autoevaluación del conocimiento que se posee de la materia.
5. Tiempo efectivo en la tarea. Las prácticas "entrenan" a los alumnos en cómo gestionar de forma eficiente el tiempo que deben dedicar a determinadas tareas.
6. Altas expectativas. Los docentes tienen que esperar lo mejor de sus alumnos y proponer prácticas de gran calidad. Esta idea es una profecía que se cumple cuando docentes e instituciones hacen lo posible y lo imposible por conseguir que los alumnos alcancen su completo potencial.
7. Respeto a la diversidad del talento y distintos modos de aprendizaje. Los alumnos necesitan oportunidades para mostrar su talento, por lo que ofrecer distintas posibilidades de aprendizaje que sean útiles para ellos es imperativo: prácticas en grupo, autoevaluación mediante problemas prácticos propuestos, simulaciones, etc.

En la Universidad de León, sólo disponemos de 4 equipos Feedback MS-150 para impartir contenidos de tipo práctico (grupos B3) en las asignaturas de Ingeniería de control (asignaturas de Ingeniería de Control y Sistemas de Control de las titulaciones de los grados de Electrónica y Automática, Ingeniería Aeroespacial e Ingeniería Eléctrica). Por tanto, necesitamos tener la posibilidad de poder conectar/desconectar de una forma sencilla dichos equipos de lo que sería la infraestructura de laboratorio remoto y además ofrecer una modernización de dichos equipos que permita realizar prácticas de un mayor valor añadido sin un desembolso de coste adicional exagerado.

La modernización consiste en la creación de un hardware específico (para el Feedback) de adquisición de datos y la utilización de unas tarjetas E/S de bajo coste que permitan comunicación por I2C. La idea es realizar un diseño general que podría ser utilizado con otro tipo de sistemas cualquiera. Sólo el hardware de adquisición y de adaptación al rango sería específico para el sistema Feedback.

La razón de que las tarjetas E/S posean comunicación I2C es importante porque esta comunicación presenta

una fácil integración con sistemas embebidos de pequeño coste como Arduino o Raspberry Pi y también con Simulink.

Teniendo en cuenta lo comentado en el párrafo anterior, montar en Raspberry un servicio parecido al que se expone en [9] hace que la conexión/desconexión del LRA-ULE pueda ser realizada de una forma bastante rápida, además de poder ser utilizado el sistema físico en prácticas presenciales cuando se desee.

Se presenta, por tanto, en este trabajo, una modernización de los equipos indicados utilizando sistemas embebidos de bajo coste (Arduino) que permitan la conexión/desconexión rápida de los mismos a/de la estructura de laboratorio remoto existente en la Universidad de León ([3]) y además que, durante las prácticas presenciales, los alumnos puedan realizar prácticas de una forma sencilla y con herramientas modernas.

2 PROBLEMA Y OBJETIVOS.

En la Universidad de León, los equipos Feedback que se utilizan se adquirieron en el año 1987 aproximadamente y, desde entonces, han estado sirviendo a su propósito sin modernización de ningún tipo.

Evidentemente, cuando a los alumnos se les plantea utilizar equipos tan "antiguos", la primera impresión que tienen es que van a utilizar algo que no es acorde a los tiempos actuales. Hay por tanto una primera barrera de rechazo que hay que intentar eliminar.

Cuando se les indica a los alumnos que utilicen una trazadora analógica (sólo disponemos de una unidad completamente operativa) para visualizar el comportamiento de las distintas señales que se pueden adquirir, aparece otra barrera de rechazo a la utilización del equipamiento: *"además de estar obsoleto, tenemos que hacer cola para utilizar el equipamiento"*.

Esta situación se agrava aún más cuando se utiliza alguno de los equipos Feedback dentro de la infraestructura de Laboratorio Remoto, porque si bien se aumenta el número de horas que pueden usar el equipo, en estas asignaturas introductorias al control, el carácter presencial de las prácticas debe prevalecer sobre el remoto (o al menos hay que realizar prácticas presenciales antes de las prácticas remotas), tal como se ha indicado al exponer los 7 principios de buenas prácticas educativas.

Por lo comentado hasta ahora, es evidente que los objetivos que hay que cumplir son:

1. Modernizar los equipos Feedback de tal forma que se puedan utilizar herramientas de software para poder leer/escribir datos y realizar control sobre los mismos.
2. Que los alumnos puedan utilizar sus propios ordenadores para realizar el control sobre los equipos Feedback y, a ser posible, con tecnologías que ellos ya conozcan o les parezcan sencillas de conocer.
3. Muy importante que los alumnos puedan tener registro de datos de todas las pruebas que realicen. Así podrán reflexionar sobre los resultados en otros momentos y el uso de los equipos estará más descongestionado.
4. La modernización no puede ser cara (por necesidades presupuestarias) y debe permitir la realización de prácticas de más valor añadido: identificación de sistemas, algoritmos de control avanzados, efectos de las no linealidades en el control, comportamiento ante señales de entrada rampa, parábola o arbitrarias, efecto del periodo de muestreo en el control, efecto de los filtros de señal en el control, etc.
5. La modernización no debe ser cara también por si el alumno quisiera "montar" todo el sistema; así él podría hacerlo en su casa con un coste no superior a 70€; salvo, claro está, el coste del equipo Feedback. Esto posibilita dejar libertad creativa a los alumnos para que propongan prácticas o situaciones distintas y que pueden ser de gran interés.

3 PLANTEAMIENTO.

Con todo lo expuesto hasta ahora, la solución *hardware* y *software* que se adopta en la Universidad de León (se pretende que los alumnos la utilicen desde ahora en años posteriores) se basa en Arduino+Simulink(Matlab) para construir un sistema de adquisición de datos que permita manipular las señales muestreadas desde Simulink (aplicando diferentes algoritmos de control) para luego actuar sobre el equipo Feedback.

Arduino es la solución más adecuada para este fin (enfoque educativo de la solución) porque se trata de un *hardware* de prototipado rápido, barato y que no es ajeno para los alumnos (no tienen rechazo a utilizarlo). Se valoraron otras alternativas como Raspberry Pi, Texas Instruments C2000 Launchpad o Xilinx Zynq con ZedBoard pero si bien la primera de ellas es una buena candidata, no se conoce tanto como Arduino y, con respecto a las otras, están más

orientadas al ámbito profesional, por lo que son más complejas de utilizar.

Dentro de la solución Arduino, se ha elegido el modelo MEGA2560 porque permite el funcionamiento en "Modo Externo" desde Simulink, por su número de entradas y salidas y su capacidad de cómputo con un precio muy ajustado.

El modelo MEGA2560 utilizado presenta carencias importantes para la adquisición de datos: no dispone de conversores digital/analógico DAC (utiliza modulación PWM para las salidas analógicas) y además los conversores analógico/digital ADC que utiliza para la lectura de señales presentan un rango de tensión en sus entradas de 0-5V y 10 bits (5 mV). Por tanto, se ha decidido utilizar/construir una etapa de adquisición de datos.

3.1 Adquisición de datos

Para solucionar el problema de la adquisición de datos, se ha optado por la utilización de dos módulos de adquisición comerciales: uno de salidas y otro de entradas analógicas, que realizan la comunicación con el Arduino por medio de un bus I2C. La utilización de ésta tecnología cumple dos funciones: compensar las carencias a nivel de *hardware* de la placa Arduino; y aislar eléctricamente la misma, minimizando el riesgo de averías que se producirían en caso de que los equipos eléctricos fallaran.

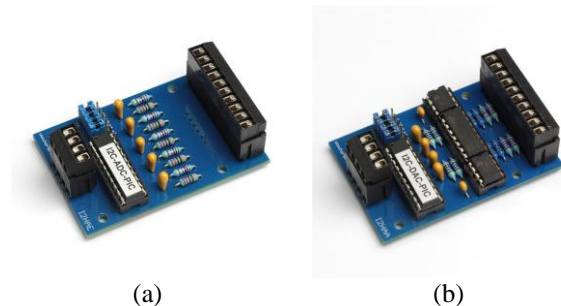


Figura 1: Módos. entradas (a) y salidas (b) analógicas.

El módulo de entradas ADC (Figura 1.a) consiste en una placa con 5 entradas analógicas con un rango de 0V a 10V, y una resolución de 10 bits, con una frecuencia de muestreo de 80Hz (suficiente para el equipo Feedback). Este módulo está controlado por un microcontrolador PIC18F13K22 y la comunicación, como se ha mencionado anteriormente, se realiza mediante I2C. Más información del mismo se puede encontrar en <https://www.horter-shop.de/en/i2c-din-rail-modules/172-kit-i2c-analog-input-module-5-channel-10-bit-4260404260745.html>.

El módulo de salidas DAC (Figura 1.b) contiene 4 salidas analógicas (sustituyendo las salidas PWM del

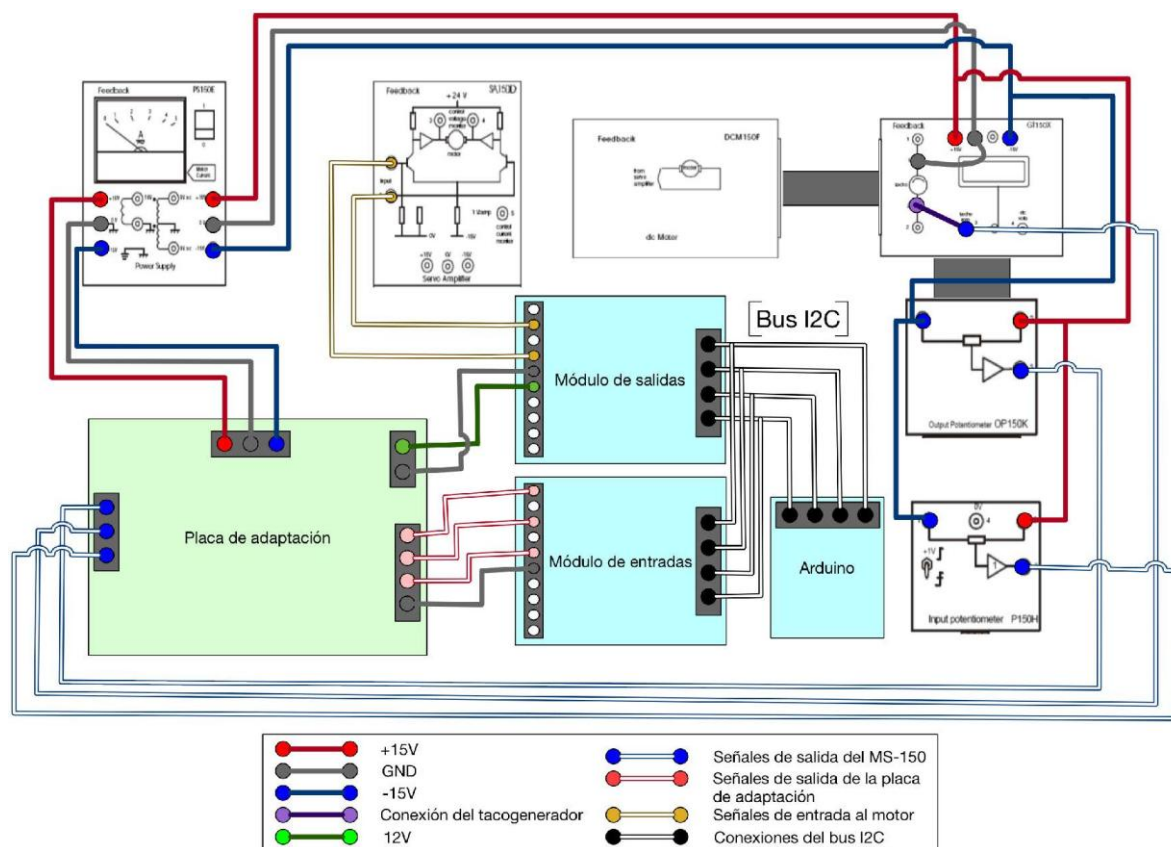


Figura 2: Conexionado elementos.

Arduino) con un rango de 0V a 10V, y una resolución de 10 bits. Éste módulo requiere ser alimentado con una fuente de voltaje constante de 12V. Este módulo está controlado por un microcontrolador PIC18F13K22 y la comunicación, igual que en el caso anterior, se realiza mediante I2C. Más información del mismo se puede encontrar en <https://www.horter-shop.de/en/home/93-kit-i2c-analog-output-module-4-channel-10-bit-4260404260752.html>.

Por último, es necesaria la fabricación de una placa de adaptación de las señales de salida del motor, puesto que del MS-150 se obtienen unas señales cuyos rangos de valores exceden los del módulo de entradas ($\pm 15V$ potenciómetros, $\pm 6V$ tacómetro). En esta placa se han incorporado algunas medidas de seguridad eléctrica, puesto que los alumnos van a manipularla:

1. Protección contra inversión de polaridad en la alimentación de la placa.
2. Protección contra sobretensión de los amplificadores operacionales y contra sobretensión en las señales de entrada
3. Limitación del rango de salida a 0-10V.

3.1.1 Comunicación.

La placa Arduino MEGA2560 es la que se encarga de leer/escribir los datos del equipo Feedback a

través de los módulos ADC y DAC mediante comunicación I2C.

El bus I2C es un tipo de bus de datos maestro-esclavo en serie. La comunicación se realiza mediante 2 líneas: una señal de reloj (SCL), y una señal de datos (SDA). Ambas líneas necesitan resistencias *pull-up* hacia Vdd.

Los esclavos se identifican mediante direcciones de 8 bits (indicando el primero si es de lectura o escritura). La comunicación se realiza en serie, es decir, se realiza sólo con uno de los dispositivos del bus al mismo tiempo. El protocolo de comunicación para cada conexión es el siguiente:

1. El maestro inicia la transmisión, indicando si quiere leer o escribir y la dirección del esclavo.
2. Se envían los datos.
3. Se envía una señal de parada.

Para la comunicación de los módulos DAC y ADC con Arduino se utilizan las señales SDA y SCL y las señales de 5V y la de masa como referencia de tensión del bus (independiente de la de la placa de adaptación).

Para leer del bus I2C los canales del módulo de entradas analógicas ADC, el fabricante indica que la sintaxis debe ser esta:

```

Val(0-1023) can1 = ValByte2 * 256 + ValByte1;
Val(0-1023) can2 = ValByte4 * 256 + ValByte3;
Val(0-1023) can3 = ValByte6 * 256 + ValByte5;
.....

```

Para escribir en el bus I2C, los canales del módulo de salidas analógicas DAC, el fabricante indica que deben enviarse paquetes de 3 bytes con la siguiente estructura:

```

Byte 0 = Canal que se utiliza (de 0 a 3);
Byte 1 = Voltaje (de 0 a 1023) - Byte 2 * 256;
Byte 2 = Voltaje (de 0 a 1023) / 256;

```

La comunicación del equipo Feedback con el ordenador del alumno se consigue a través de una conexión USB tipo A/B entre la placa Arduino MEGA2560 y el software Simulink (encargado de recibir, procesar, visualizar y enviar las distintas señales del equipo Feedback). La versión de Matlab utilizada ha sido la R2016b (muy importante este aspecto porque los módulos simulink encargados de la comunicación I2C no funcionaban de forma adecuada en versiones anteriores).

3.2 Simulink

Se considera el uso de Simulink como pieza central de software que los alumnos pueden utilizar, aunque es un programa orientado a la simulación y no está optimizado para su uso en tiempo real. La inclusión en las últimas versiones del programa de soporte para placas de prototipado rápido, además de la posibilidad de ejecución en modo externo en tiempo real solventan este problema. Es una herramienta muy visual que permite que los alumnos la utilicen sin necesidad de tener conocimientos básicos de programación.

Además, el uso de Simulink aporta las siguientes ventajas:

1. Es un software ampliamente extendido en la simulación de sistemas de control, tanto a nivel profesional como educativo, lo que reduce la curva de aprendizaje necesaria para su utilización.
2. Ofrece un gran abanico de opciones en lo referente a la simulación de sistemas de control, las cuales están automáticamente disponibles para el desarrollo de cualquier algoritmo que se desee implementar en el sistema.
3. Ofrece soporte oficial para la placa Arduino, siendo fácil e intuitiva la instalación y configuración de los paquetes de soporte.
4. Utiliza una interfaz de usuario suficientemente intuitiva como para permitir

el uso de modelos creados previamente, como si de un programa con una interfaz gráfica se tratara, sin necesidad de estar familiarizado con su funcionamiento a nivel interno.

Para facilitar el uso del equipo Feedback, tanto por parte del docente como de los alumnos, se ha creado un conjunto de prácticas (ficheros en formato MDL) en los que se han incluido elementos de interacción directa como botones, ruletas, *sliders*, ... que pertenecen a la librería "Dashboard" del programa y se han ocultado todos aquellos bloques ajenos a las tareas de control. Así la apariencia del interfaz de usuario es similar al control teórico que se pretende estudiar en la práctica en concreto.

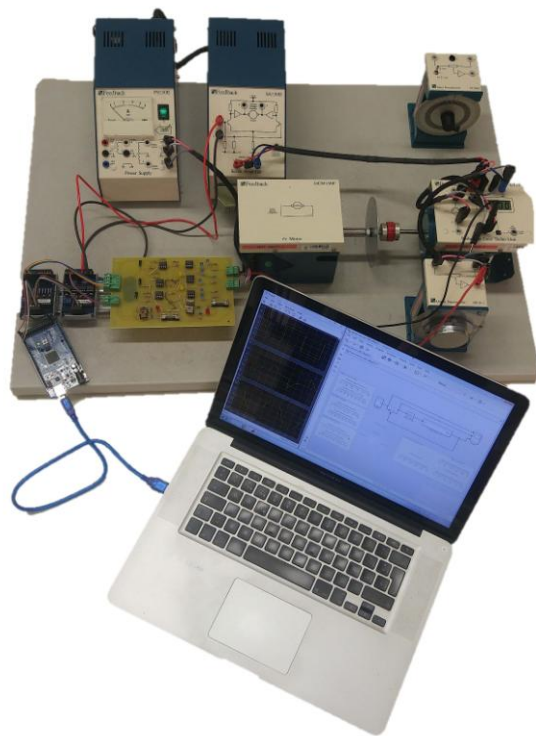
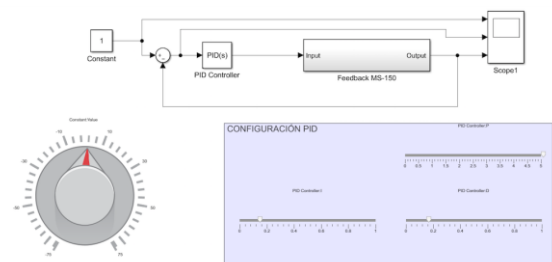


Figura 3: Interfaz usuario. Control posición PID.

Para poder comunicarse con Arduino desde Simulink es necesaria la instalación de los paquetes de soporte oficiales [7][8]. De esos paquetes se utilizan los bloques "I2C Write" y "I2C Read".

Para que el uso de los interfaces sea más flexible, se presupone que siempre se utilizará la opción de

funcionamiento en modo externo, que supone que el alumno/profesor ejecutará el control en simulink y Arduino operará como un hardware externo dedicado sólo a la lectura/escritura de señales.

Dentro de Simulink se realiza toda la conversión y adaptación al rango de señales de valor entero a grados y rpm de tal forma que todos los bloques involucrados se han incluido dentro de un subsistema que se ha llamado "Feedback MS150". Este subsistema consta de una entrada (la del módulo servoamplificador SA150D) y 2 salidas (posición en grados del eje del motor y velocidad en rpm).

3.2.1 Prácticas interactivas realizadas.

En la Universidad de León se dispone de una secuencia de prácticas de control y se las ha modernizado siguiendo todos los pasos anteriores de tal forma que se dispone de un pequeño guión de cada práctica donde el alumno debe realizar una serie de tareas con el equipo físico y almacenar los datos de la sesión para luego realizar otras tareas por su cuenta fuera del laboratorio.

Las prácticas obligatorias que se proponen a los estudiantes son 10, relativas a:

	Objetivo
P01	Módulos del equipo. Familiarizarse con los diferentes módulos equipo Feedback.
P02	Comprender operación, en cadena abierta, de motor CC. accionado por servoamplificador.
P03	Respuesta motor. Analizar el comportamiento del motor ante cambios bruscos en su entrada. Determinar la función de transferencia.
P04	Señal de error. Acción de control. Señal de salida. Representación de las señales y características de las mismas: cte. tiempo, sobreoscilación, tiempo establecimiento,
P05	Control de posición I. Efecto de la realimentación en control de posición de un motor CC.
P06	Control de posición II. Qué es la zona muerta en un control de posición en lazo cerrado. Relación con la ganancia del sistema.
P07	Control de velocidad I. Entender cómo se puede controlar y mantener estable la velocidad de giro del motor mediante el uso de un tacogenerador como realimentación.
P08	Control de velocidad II. Realizar un control de la velocidad de giro de un motor en los dos sentidos.
P09	Control de posición III. Implementar un control doblemente realimentado que mejora la respuesta del sistema de control de posición en lazo cerrado.
P10	Control no lineal. Comprender los efectos de utilizar bloques no lineales incluidos en

	Simulink, tanto como reguladores, como integrantes de otros elementos.
--	--

4 RESULTADOS-CONCLUSIONES.

A fecha de hoy (hemos acabado en estos días la implementación de la solución), sólo hemos podido evaluar el comportamiento del hardware y las posibilidades de integración que ofrece. Pretendemos en el curso que viene hacer uso de la solución con alumnos de los primeros cursos de Ingeniería de Control. No obstante, a pesar de sólo ofrecer el punto de vista del docente, la modernización del equipo Feedback ofrece:

1. El docente puede ofrecer otro tipo de prácticas más avanzadas utilizando el equipo Feedback, desde el momento que la estructura se sustenta en realizar el control de un sistema muestreado.
2. El cableado de la solución se simplifica enormemente y se parece más a los lazos de control que pueden encontrarse en la industria.
3. La capacidad de muestreo de las tarjetas utilizadas (80Hz) es más que suficiente para la dinámica del sistema.
4. La estructura propuesta es muy flexible en el sentido de que se pueden visualizar muchos efectos: cómo afecta el tiempo de muestreo al control, aparición de ciclos límite con controles no lineales, cómo afecta la ganancia de un controlador al control y a las características del ciclo límite, cuál es el efecto de la zona muerta, cuál es el efecto de la saturación, cuál es el efecto de la histéresis y cómo evoluciona el sistema cuando se introduce un regulador cualquiera o el comportamiento en frecuencia del mismo.
5. Los alumnos podrán obtener todas las muestras de la sesión de prácticas y ya dentro del workspace de Matlab, sin perder tiempo en conversiones de ficheros o enlaces a fuentes de datos remotas.
6. Los alumnos visualizan una gráfica de evolución de la señal de salida al mismo tiempo que observan la evolución del motor.
7. El coste del hardware que se ha tenido que realizar no supera los 100€; coste mínimo desde el momento que la vida del equipo Feedback se alarga y además se puede utilizar para explicar otros conceptos para los que no fue diseñado inicialmente.
8. Los interfaces de usuario creados son muy intuitivos y la operación de la estructura es

muy estable, sin ningún problema de operación.

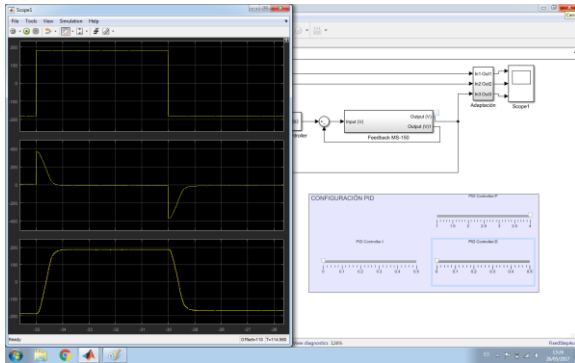


Figura 4: Resultado control posición-velocidad PID (sólo acción proporcional $K_p=4$).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado por REMOTLAB, Grupo de Innovación Docente de la Universidad de León (GID18), y financiado en parte por la convocatoria PAGID2016 de dicha universidad.

Referencias

- [1] A.W. Chickering, and S.C. Ehrmann, "Implementing the Seven Principles of Good Practice in Undergraduate Education: Technology as Lever," *American Association for Higher Education Bulletin*, California, USA, 1996.
- [2] A.W. Chickering, and Z.F. Gansom, "Applying the Seven Principles for Good Practice in Undergraduate Education: New directions for Teaching and Learning" (Chickering, A. W. & Gamson, Z. F.), 47, Jossey-Bass, San Francisco, CA, USA, 1991.
- [3] M. Domínguez, P. Reguera, and J.J. Fuertes, "Laboratorio remoto para la enseñanza de la Automática en la Universidad de León", RIAI, Madrid, Spain, 2005 (In Spanish).
- [4] Domínguez, M., Marcos, D., Reguera, P., González, J.J., Blázquez, L.F., (2001) "Connection Pilot Plant to the Internet", *IFAC Internet Based Control Education*. IBCE01, Madrid. España.
- [5] Dormido, S. (2002). "Control Learning: present and future". *15th IFAC World Congress*. Barcelona.
- [6] R.M. Felder, G.N. Felder, and E.J. Dietz, "A Longitudinal Study of Engineering Student Performance and Retention Vs Comparisons with Traditionally Taught Students," *Journal of Engineering Education*, vol. 87, n° 4, pp. 469-480, 1998.
- [7] Mathworks (2017). Arduino Support from MATLAB. <https://es.mathworks.com/hardware-support/arduino-matlab.html>
- [8] Mathworks (2017). Arduino Support from Simulink. <https://es.mathworks.com/hardware-support/arduino-simulink.html>
- [9] Reguera, P., García, D., Domínguez, M., Prada, M.A., Alonso, S., (2015) "A Low-Cost open source hardware in Control Education. Case study: Arduino-Feedback MS-150". *Science Direct, IFAC-PapersOnLine* 48-29 (2015) 117-122

INNOVACIÓN PEDAGÓGICA EN LA FORMACIÓN DEL PERFIL PROFESIONAL PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL A TRAVÉS DE UNA APROXIMACIÓN HOLÍSTICA

J. C. Ríos.

Seresco. C/ Santa Susana, nº 14 - Oviedo (Asturias), jcarlosriosfernandez@gmail.com

L. Alonso.

Seresco. C/ Santa Susana, nº 14 - Oviedo (Asturias), villapedre89@hotmail.com

J. A. Alonso.

Seresco. C/ Santa Susana, nº 14 - Oviedo (Asturias), jesus24alonso@gmail.com

D. Álvarez.

Seresco. C/ Santa Susana, nº 14 - Oviedo (Asturias), ooxabazoo@gmail.com

Z. D. Babel.

Seresco. C/ Santa Susana, nº 14 - Oviedo (Asturias), yanetabel@gmail.com

A. García.

Seresco. C/ Santa Susana, nº 14 - Oviedo (Asturias), jans.garcia.g@gmail.com

P. O. Hernández.

Seresco. C/ Santa Susana, nº 14 - Oviedo (Asturias), pabloseresco1@outlook.es

D. Martínez.

Seresco. C/ Santa Susana, nº 14 - Oviedo (Asturias), danielmm789@gmail.com

J. Miranda.

Seresco. C/ Santa Susana, nº 14 - Oviedo (Asturias), jorgemlucje@gmail.com

J. M. Paredes.

Seresco. C/ Santa Susana, nº 14 - Oviedo (Asturias), jmparedesrojo@gmail.com

C. M. Valdés.

Seresco. C/ Santa Susana, nº 14 - Oviedo (Asturias), cmanuvp@mail.com

Resumen

El curso de “Desarrollo de Proyectos de Sistemas de Automatización Industrial” impartido por Seresco, se realiza ante la demanda de un contexto económico y tecnológico que justifica este tipo de acciones formativas. Seresco es una empresa de soluciones y servicios con presencia internacional, que imparte Formación Reglada. A los alumnos se les dota de unas capacidades para resolver problemas reales complejos, pudiendo abordarlos desde varias perspectivas. El curso se desarrolla con una metodología de formación innovadora basada en métodos de aprendizaje donde se pone al alumno en el centro de la acción y se potencia su autoaprendizaje guiado por el docente. La motivación de la labor de innovación docente desarrollada ha sido el alumnado. Promoviendo actitudes de colaboración, compartir conocimientos y experiencias profesionales, estimular el estudio y animar al desarrollo de casos prácticos en el ámbito de la automatización. Los objetivos han sido la capacitación del alumno para el desarrollo de proyectos de automatización, la obtención del certificado de profesionalidad de “Desarrollo de proyectos de sistemas de automatización industrial”, mejorar la cualificación profesional y la capacidad

de inserción a través del aprendizaje, favorecer el desarrollo profesional, mejorar el empleo e incrementar la productividad y participación en jornadas y congresos de automatización. Los resultados obtenidos a través del monitoreo del nivel de asimilación de los conocimientos, por parte del alumnado, han permitido observar una buena admisión de conocimientos en base a la identificación de equipos para el montaje de sistemas de control, conocimiento de las técnicas de construcción de cuadros de control para procesos secuenciales de automatización industrial y diseño de circuitos neumáticos, hidráulicos y eléctricos funcionales así como el conocimiento de sus componentes, realización de proyectos técnicos, implantación de medidas de seguridad y manejo de reglamentos y normativas. Además de un gran interés por desarrollar una carrera profesional en el sector de la automatización y por continuar desarrollando y aumentando el nivel de conocimientos técnicos a nivel universitario.

Palabras Clave: Educación. Automatización. Pedagogía. Innovación. Sistemas de control.

1 INTRODUCCIÓN

“En el escenario económico en el que nos encontramos actualmente, la formación constituye un elemento estratégico clave para reforzar la productividad y competitividad de las empresas, así como para potenciar la empleabilidad de los trabajadores ante los continuos cambios que se producen” [1].

La Formación Profesional para el Empleo es el resultado de la combinación de la antigua Formación Ocupacional y la Continua como método para el aprendizaje en el ámbito profesional y laboral. Así, esta formación se ha convertido en esencial para favorecer la empleabilidad, que va inevitablemente unida a una economía basada en el conocimiento y el mantenimiento de la capacitación profesional del personal en situaciones de cambios en el entendimiento de los procesos productivos o de la cadena de valor de las empresas. Además de ayudar a mejorar la empleabilidad, en especial de aquellas personas con mayores dificultades de inserción laboral o de mantenimiento del empleo [2].

En el Principado de Asturias, la Formación para el Empleo se articula a través de las siguientes líneas de actuación [3]:

- Acciones formativas dirigidas prioritariamente a personas desempleadas, incluyendo la formación con compromiso de contratación.
- Acciones formativas dirigidas a mejorar la adaptabilidad de trabajadores y la empleabilidad de los desempleados.
- Planes de formación para ocupados y acciones de apoyo y acompañamiento a la formación.
- Programas de Empleo-Formación.

En Seresco, conocedores de este marco global, se ha venido desarrollado una importante actividad formativa desde 1969 y son muchos miles de alumnos los que han pasado por sus aulas en titulaciones oficiales, cursos especializados o formación para el empleo.

El área de formación cuenta con un equipo de profesionales cualificados y con gran experiencia en todas las áreas formativas: Calidad, Gestión de empresa. Económica y Financiera, I+D+i, Idiomas, Informática Aplicada, Laboral y Fiscal, Logística y Producción, Marketing y Ventas, Medioambiente, Prevención de Riesgos Laborales, Recursos Humanos, Tecnología de la Información [4].

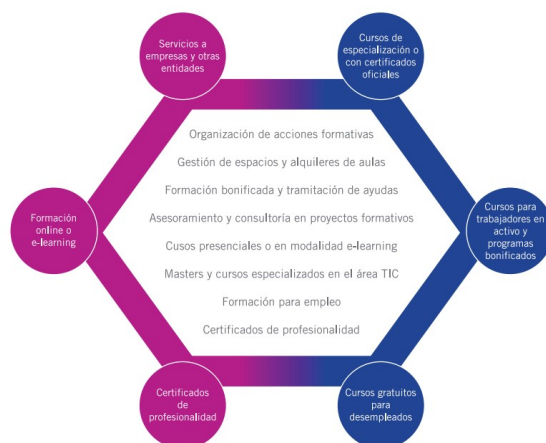


Fig. 1. Formación en www.seresco.es

Dentro de este contexto y en las puertas de la cuarta revolución industrial la importancia de la automatización industrial es cada vez más clara como punta de acción de áreas tan en desarrollo actualmente como son la robótica o la programación, basándose en el “big data”. Su importancia, desde el punto de vista praxiológico, se deriva de las grandes ventajas competitivas que ofrece a las Empresas, a través de un proceso de mecanización de las actividades industriales para simplificar el trabajo y conseguir procesos más rápidos y eficientes.

Debido al acelerado desarrollo de la tecnología de microcontroladores y ordenadores, la tecnología de automatización se ha convertido en el área más innovadora y con mayor vida de la electrotecnia [5]. A ello se debe agregar que las nuevas soluciones industriales, como la descentralización y visualización, requieren nuevos sistemas de instrucción. Es, por tanto, un área de conocimiento y formación con un interés creciente en la industria y en la sociedad. Queda completamente justificada la inversión en formación, con el fin de ampliar los conocimientos de los profesionales existentes, así como la formación especializada de nuevos perfiles técnicos, favoreciendo la reinserción laboral.

2 MOTIVACIÓN

La motivación principal de la actividad de innovación docente desarrollada en el curso ha sido el alumnado. Se pretendía promover actitudes de colaboración, compartir conocimientos y experiencias profesionales, estimular el estudio y animar al desarrollo de casos prácticos en el ámbito de la automatización.

3 OBJETIVOS

Con el desarrollo de este curso de cualificación profesional grado 3 se ha conseguido:

1.- La capacitación para el desarrollo de proyectos de instalaciones de potencia eléctrica, regulación y control, robóticas, manipuladores, comunicaciones y equipos de transmisión para sistemas de automatización industrial, a partir de condiciones dadas, consiguiendo los criterios de calidad, en condiciones de seguridad, respeto medioambiental y cumpliendo la normativa vigente.

2.- Obtener el certificado de profesionalidad de “Desarrollo de proyectos de sistemas de automatización industrial”.

3.- Mejorar la cualificación profesional y capacidad de inserción a través del aprendizaje de distintas competencias profesionales incluyendo el desarrollo de proyectos de sistemas de control, de medida y regulación y de comunicación en sistemas de automatización industrial.

4.- Favorecer el desarrollo profesional.

5.- Mejorar el empleo e incrementar la productividad.

6.- Participación en Jornadas y Congresos de Automatización.

4 PLANIFICACIÓN

El curso se desarrolla durante 4 meses lectivos, con una duración de 700 horas incluyendo tanto base teórica como práctica con formación en las empresas colaboradoras. En la Fig. 2 se enumeran los diferentes módulos formativos y su distribución porcentual:

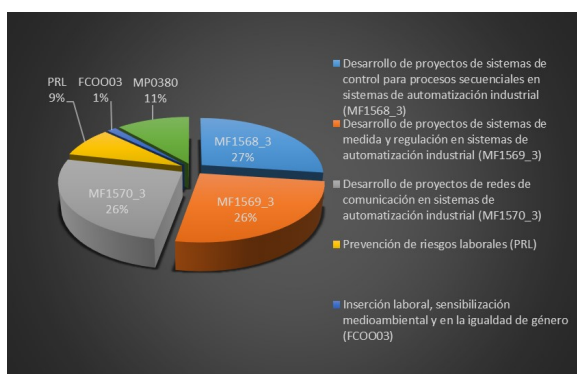


Fig. 2: Gráfico de distribución de módulos formativos.

5 MATERIALES

El aula donde tienen lugar estos cursos dispone de equipos audiovisuales y PC's instalados en red para el trabajo colaborativo de todos los alumnos, un cañón de proyección y pantalla pedagógica táctil para la visualización y utilización del material docente. Para la consecución de los objetivos previstos del curso se cuenta con un software ofimático de gestión y uno específico de automatización descrito a continuación:

- Office
- FluidSIM 5.2b
- TIA Portal (Step 7 v12)
- RSLogix 5000
- CodeSYS
- Automation Studio v4
- ISPSOft
- Sysmac Studio
- Autocad
- Presto
- Microsoft Project

6 METODOLOGÍA

En la formación del siglo XXI se han incorporado nuevas herramientas y nuevos métodos de aprendizaje ajustados al nuevo contexto social y tecnológico que el mundo está viviendo. Si bien, los clásicos métodos conductivistas no han (ni tienen) por que caer en el olvido, también es cierto que las nuevas metodologías o la adaptación de las clásicas permiten a los alumnos actuales prepararse para un mundo donde los problemas son cada vez más complejos y el tiempo de respuesta para dar soluciones cada vez menor. Es por esto que, en este curso, se ha optado por una metodología combinada utilizando técnicas innovadoras en el campo docente, proporcionando a los alumnos de una visión holística de los problemas que van a encontrarse en el mundo real, a fin de dotarlos de capacidad para encontrar soluciones óptimas a las múltiples variables a las que van a tener que responder.

Para la consecución de esta tarea, se utilizan las siguientes técnicas de enseñanza combinadas en los diferentes módulos:

- *Flipped Classroom o Aula Invertida*: un enfoque pedagógico en el que la instrucción directa se mueve desde el espacio de aprendizaje colectivo hacia el espacio de aprendizaje individual y el entorno resultante se transforma en un ambiente de aprendizaje dinámico e interactivo en el que el educador guía a los estudiantes a medida

que se aplican los conceptos y puede participar creativamente en la materia [7].

- *Técnica Exegética o Lectura Comentada*: un concepto que involucra una interpretación crítica y completa de textos relacionados con el tema a tratar, apoyándonos en las nuevas tecnologías [8].
- *Autoaprendizaje*: consiste en aprender mediante la búsqueda individual de la información y la realización también individual de prácticas o experimentos. De esta manera se facilita al alumno centrarse en los aspectos desarrollados en clase que más le puedan interesar. Destaca la investigación, el resumen de los contenidos encontrados y el uso de mapas mentales para facilitar la síntesis y la nemotécnica.
- *Design Thinking*: (*Entender-Observar-Definir-Idear-Prototipar-Testear*): utilizando la metodología del pensamiento de diseño (design thinking) para analizar problemas complejos y resolverlos colectivamente. Rompemos los paradigmas preestablecidos para abordar problemas complejos desde perspectivas diversas para hacer que lo complejo se vuelva fácil usando la metodología secuencial descrita o herramientas como “visual thinking” [9].



Fig. 3: Técnicas de aprendizaje.

7 RESULTADOS

El curso se puso en marcha con la apertura de solicitudes a través del portal trabajastur, se realizó una prueba de selección a causa de la alta demanda para las plazas previstas y atendiendo al baremo

prefijado, se procedió a la confirmación de los alumnos admitidos.

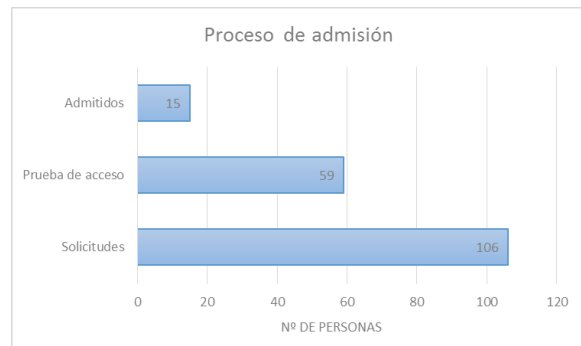


Fig. 4: Proceso de admisión.

El curso tenía ofertadas 15 plazas de las cuales se llegó al 100% de ocupación y se recibieron un total de 106 solicitudes, demostrando el interés del mercado en este curso.

El sistema de evaluación prefijado para el seguimiento de los conocimientos adquiridos por los alumnos ha ido dejando datos de la evolución como los siguientes.

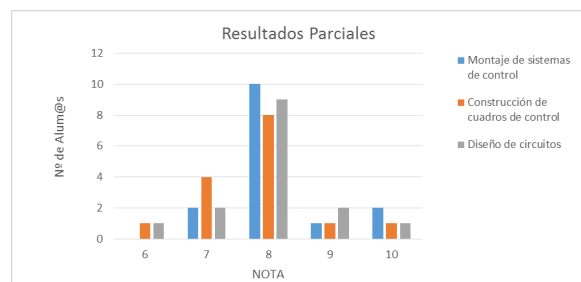


Fig. 5: Resultados parciales.

Con dichas pruebas se monitorea el nivel de asimilación de los conocimientos, por parte del alumnado, de una manera continua y se prepara al alumno para la prueba de conjunto al final de cada unidad de competencia.

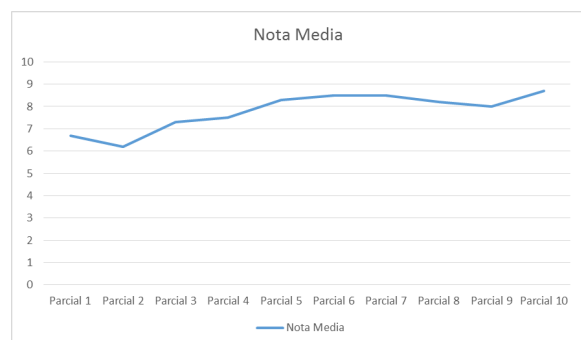


Fig. 6: Evolución de la nota media.

Con estos primeros resultados se puede observar una buena admisión de conocimientos en base a la identificación de equipos para el montaje de sistemas de control, conocimiento de las técnicas de construcción de cuadros de control para procesos secuenciales de automatización industrial y diseño de circuitos neumáticos, hidráulicos y eléctricos funcionales así como el conocimiento de sus componentes, realización de proyectos técnicos, implantación de medidas de seguridad y manejo de reglamentos y normativas.

Además de apreciarse en el alumnado un gran interés por desarrollar su carrera profesional en el sector de la automatización y por continuar desarrollando y aumentando el nivel de conocimientos técnicos a nivel universitario mediante grados y másteres técnicos.

8 CONCLUSIONES

La formación en el espacio económico mundial actual, es necesaria tanto para el reciclaje de los profesionales activos como puerta de inclusión en el mundo laboral de las personas en riesgo de exclusión. Atendiendo a este hecho, el Principado de Asturias y Seresco, participan activamente en acciones formativas de vanguardia como el curso en “Desarrollo de Proyectos de Sistemas de Automatización Industrial” del cual queda comprobado y justificado su validez e importancia para la industria regional y global.

En consecuencia, con esta línea estratégica, el curso se edifica sobre los pilares de una educación innovadora, donde el alumno cobra todo el protagonismo en su propia educación. Apoyándose en nuevas técnicas de formación, guiadas siempre por docentes con amplia experiencia tanto en la enseñanza como en el terreno profesional.

El curso que se está desarrollando, deja ya datos relevantes acerca del interés del público objetivo, superando en un 700% las plazas ofertadas y obteniéndose, al finalizar el primer módulo formativo, unos primeros resultados realmente satisfactorios en cuanto a la adquisición de conocimientos por parte de los alumnos.

9 AGRADECIMIENTOS

Desde el aula de “Desarrollo de Proyectos de Sistemas de Automatización Industrial” queremos agradecer el empeño por ofrecer los mejores servicios y la empatía para ayudar en las cuestiones del día a día a todos los integrantes de Seresco que hacen posible este curso y este tipo de acciones de formación complementaria.

10 BIBLIOGRAFÍA

(20/06/2017) Trabajastur.

<https://www.asturias.es/portal/site/trabajastur> [1]

(21/06/2017) Consejo de Asturias de la Formación Profesional.

<http://www.consejoasturiasfp.com/consejo.php?seccion=desempleados&sub=que-es-la-formacion-para-el-empleo> [2] [3]

(21/06/2017) Seresco.

<https://www.seresco.es/formacion-asturias/escuela-seresco> [4]

Rigo Elizardi (21/06/2017) Automatización en las empresas.

<http://riqooberto.blogspot.com.es/2009/02/la-importancia-de-la-automatizacion-en.html> [5]

(21/06/2017) BOE.

<https://www.boe.es/boe/dias/2011/12/10/> [6]

García Aretio, L. (2013): Flipped classroom, ¿b-learning o EaD? Contextos Universitarios Mediados, nº 13,9 (ISSN: 2340-552X) [7]

Dora Villareal (21/06/2017). Métodos y estrategias.

<http://metodosyestrategias.blogspot.com.es/2012/02/la-tecnica-de-la-exegesis-o-exegetica.html> [8]

(21/06/2017) Dschool Stanford. Universidad de Stanford. <https://dschool.stanford.edu/> [9]

Aprendiendo Simulación de Eventos Discretos con JaamSim

Enrique Teruel

Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas, Universidad de Zaragoza, eteruel@unizar.es

Rosario Aragüés

Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas, Universidad de Zaragoza, raragues@unizar.es

Resumen

El aprendizaje, en particular de materias técnicas como la simulación de sistemas dinámicos, requiere que los estudiantes desarrollen casos de diverso nivel de complejidad, desde pequeños ejemplos didácticos hasta proyectos de cierta envergadura. Para ello es ineludible el uso de herramientas profesionales accesibles, lo que es prácticamente sinónimo de código abierto. En este artículo informamos de nuestra experiencia con JaamSim, un paquete de simulación que incluye una interfaz “arrastrar-y-soltar”, gráficos interactivos, procesamiento de entradas y salidas, y herramientas de desarrollo de modelos. El grado de madurez de la herramienta, y su comunidad de usuarios, nos parece más que suficiente para sustituir con ventaja otras opciones propietarias o con licencias de estudiante limitadas, si bien JaamSim todavía debe seguir evolucionando, sobre todo en aspectos de usabilidad, para lo que la contribución de los usuarios es fundamental. Una ventaja de algunas populares herramientas propietarias es la existencia de material didáctico, pero consideramos que puede suplirse ventajosamente compartiendo en abierto material didáctico análogo, especialmente ejemplos y casos desarrollados, por lo que contribuimos con el material de nuestro curso, que esperamos aumentar y perfeccionar en sucesivas ediciones.

Palabras Clave: Simuladores, Lenguajes de simulación, Sistemas de eventos discretos, Educación, Herramientas software.

1 INTRODUCCIÓN

A la hora de diseñar una asignatura, y sus procesos de enseñanza-aprendizaje, nos parece primordial centrarse en el trabajo que harán los estudiantes en las sesiones prácticas y por su cuenta, pues como mejor se aprende es haciendo (Brown *et al.*, 2014), poniendo en práctica los conceptos explicados y usando herramientas de nivel profesional. Esto es más cierto si cabe cuando la modalidad de enseñanza no es plenamente presencial, y los estudiantes deben realizar su aprendizaje

práctico autónomamente, algo que se ha revelado de forma acuciante tras la aparición de cursos masivos en línea (MOOC's), donde predominan las versiones de código abierto como herramientas para todo tipo de materias, especialmente aquéllas en las que, al igual que en la simulación, se requiere ponerse manos a la obra para aprender y compartir (Conole, 2013).

Este era el reto al que nos enfrentábamos al rediseñar la asignatura de Simulación de Sistemas Dinámicos en el grado de Ingeniería Electrónica y Automática de la Universidad de Zaragoza, que se imparte en la Escuela de Ingeniería y Arquitectura, en Zaragoza, y en la Escuela Universitaria Politécnica de Teruel, donde se está planteando la conveniencia de ofrecer el curso en modalidad semi-presencial. Previamente la asignatura se impartía utilizando Arena para la simulación de eventos discretos y Matlab-Simulink para la simulación de sistemas continuos e híbridos. Desgraciadamente, estas herramientas sólo estaban disponibles en los laboratorios, pues ambas tienen costes de licencia elevados. En realidad de la primera hay una versión para estudiantes gratuita pero, como suele suceder en estos casos, está drásticamente limitada. Tras un análisis de alternativas más accesibles, idealmente de código abierto, nos decantamos por sustituirlas con JaamSim y OpenModelica, respectivamente. En este artículo nos centramos en el caso de la simulación de eventos discretos, con JaamSim (JaamSim Development Team, 2017), pues la disponibilidad de herramientas de código abierto para simulación de eventos discretos es relativamente reciente y todavía escasa (Dagkakis y Heavey, 2016), mientras que el uso de Modelica (Mattson *et al.*, 1998), un lenguaje estándar de modelado, abierto y con otras ventajas fundamentales para el modelado de sistemas dinámicos, consideramos que está más extendido y documentado (Fritzson, 2015; Tiller, 2014; Martín *et al.*, 2005). No obstante, todo el material del curso se deja accesible en abierto, también el cubierto por OpenModelica (herramienta de código abierto basada en Modelica), que consiste en un “OpenModelica Notebook” adaptado de “DrModelica”, basado en (Fritzson, 2015), incluyendo numerosos ejemplos de (Tiller, 2014), y con algunas contribuciones originales.

El material es abierto, accesible a través de (Teruel, 2017), de libre distribución (bajo licencia CC-BY-SA), es prácticamente el mismo que se pone a disposición de los estudiantes, y consiste en presentaciones y otros documentos y archivos compartidos en Google Drive, incluyendo ejemplos realizados con las herramientas. Aunque sea muy brevemente, queremos destacar la conveniencia de la plataforma Google Drive (en nuestro caso dentro del programa Google Apps for Education, suscrito por nuestra Universidad, y combinada con nuestra plataforma LMS, que está basada en Moodle). Los estudiantes pueden acceder a las presentaciones completas, con sus animaciones y anotaciones, y enlaces al material complementario desarrollado (modelos, hojas de cálculo, etc), y para los profesores supone un considerable ahorro de tiempo a la hora de editar y compartir el material.

Tras una primera edición del curso consideramos que nuestros objetivos se han cumplido muy satisfactoriamente, lo que nos ha motivado a poner en común la experiencia para que pueda ser reutilizada y enriquecida por nuestros colegas. Pensamos, además, que muchas de las ideas metodológicas y logísticas pueden aprovecharse igualmente en otras disciplinas, en particular las hemos puesto también en práctica en una asignatura básica de Sistemas Automáticos (en el grado de Ingeniería Mecánica) donde nos hemos apoyado en Scilab/Xcos como alternativa a Matlab-Simulink.

2 DISEÑO DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS

Tras una introducción general a la simulación, que podría definirse como experimentación con modelos (típicamente, aunque no exclusivamente, matemáticos-informáticos), el curso se divide en dos partes, una dedicada a los sistemas de eventos discretos y otra a los sistemas continuos e híbridos. Dado que el contexto de la asignatura es un grado de ingeniería electrónica y automática, el énfasis se pone en sistemas de producción y logísticos, y en sistemas técnicos automatizados, aunque esta disciplina interesa a otros perfiles, y de hecho se imparte en numerosas universidades también a estudiantes de la rama económica-empresarial, de la rama informática, o de la rama científica.

2.1 ¿LENGUAJE DE PROPÓSITO GENERAL, LENGUAJE DE SIMULACIÓN, O SIMULADOR?

El perfil de los estudiantes motiva una de las primeras decisiones a tomar en el diseño: usar como herramienta o vehículo un lenguaje de programación

de propósito general, un lenguaje de simulación, o un simulador. Es un debate que se ha recogido en la literatura (Leemis y Park, 2006), y en el que, a nuestro juicio, la respuesta más apropiada es diferente para cada perfil: mientras para los estudiantes informáticos, o para los más interesados en construir simuladores específicos, la opción preferente será un lenguaje de propósito general, para los estudiantes con perfil de gestión es preferible un simulador capaz y amigable. En nuestro caso, entre ambos extremos, pensamos que deben mostrarse las bases para la programación de simuladores, pero conviene usar un lenguaje de simulación de alto nivel que permita desarrollar y analizar desde el principio ejemplos gradualmente más complejos, punto de vista que coincide con (Law y Kelton, 2000), que es uno de los libros seleccionados como referencia básica. Sin embargo, a diferencia de (Kelton *et al.*, 2015), preferimos una herramienta de código abierto, de forma que los estudiantes no vean limitada su capacidad de modelado (cosa que sucede en la versión para estudiantes de Arena), y a la vez tengan la posibilidad de acceder al código fuente, para adaptarlo o para aprender sobre la construcción de un simulador profesional.

2.2 BIBLIOGRAFÍA Y HERRAMIENTA RECOMENDADA

La decisión sobre el tipo de herramientas a usar para construir modelos de simulación condiciona la bibliografía básica a recomendar, que en nuestro caso han sido los libros de Law y Kelton (2000) y de Altioik y Melamed (2007), este último por consideraciones de disponibilidad para nuestros estudiantes (nuestra biblioteca dispone de la versión electrónica, luego todos los estudiantes pueden disponer de él), a falta de un buen texto con acceso abierto, o/y de un texto que se apoyase en JaamSim.

El programa resultante (sobre simulación de eventos discretos) ha sido:

- Introducción a la simulación de eventos discretos
- Lenguajes de simulación y simuladores. Introducción a JaamSim
- Modelado y simulación de sistemas de producción y logísticos
- Técnicas estadísticas
- Desarrollo de casos

Con algo de inspiración “flipped-classroom” nuestra intención era dedicar las clases (unas veinte horas para esta parte) a presentar e ilustrar los conceptos siempre sobre ejemplos lo bastante “ricos”, de forma activa y participativa, y no para explicaciones que pueden, o deben, leerse/verse fuera de clase.

Esto conduce a la tercera decisión, que fue seleccionar y desarrollar en JaamSim ejemplos, en general tomados de los textos de referencia, y dejarlos a disposición de los estudiantes, tanto por el

interés conceptual que tienen los sistemas modelados y analizados como por la utilidad para aprender por imitación/inspiración las técnicas básicas de modelado.

2.3 UN REPOSITORIO DE EJEMPLOS

Nuestra intención es desarrollar y ampliar un conjunto variado de ejemplos, bien documentados. Probablemente incorporaremos el resultado de los mejores trabajos de nuestros estudiantes. Inicialmente se han desarrollado los siguientes ejemplos, adaptados a partir de la literatura recomendada, donde se discuten o ilustran con otras herramientas, típicamente Arena:

- Un ejemplo introductorio básico (servidor-cola), adaptado de la Sección 5.2 de (Altiok y Melamed, 2007) y la Sección 3 del manual de usuario de JaamSim (JaamSim Development Team, 2017) que se desarrolla paso a paso a la vez que se presentan conceptos fundamentales sobre modelado y análisis de simulaciones de Montecarlo.
- Una línea de producción, adaptado del Cap. 11 de (Altiok y Melamed, 2007).
- Un sistema de fabricación flexible con AGV's para transporte entre células, adaptado de la Sec. 13.5 de (Law y Kelton, 2000).
- Un ejemplo sobre políticas Push, Pull y Kanban, inspirado en el ejemplo "Kanban Game. Making Robots" de la colección de The Big Lean Simulation Library (JaamSim Development Team, 2017).
- Dos ejemplos de cadena de suministro, adaptados del Cap. 12 de (Altiok y Melamed, 2007).
- Un ejemplo de un peaje, adaptado de la Sec. 13.4 de (Altiok y Melamed, 2007).

Estos ejemplos se usan en clase para presentar los conceptos a la vez que se enseña a modelar y analizar, y varios se trabajan en las clases prácticas, cuyo contenido puede verse en el documento "Cuestionarios" de (Teruel, 2017), en tareas de modelado, depuración de errores y verificación o de análisis y optimización de prestaciones. También sirven como inspiración para los estudiantes en el momento de realizar sus trabajos de asignatura, que constituyen la principal actividad evaluable, y que este primer curso hemos tomado de los "Arena Contest Problems" de (Kelton *et al.*, 2015).

Las primeras versiones de algunos de estos ejemplos han sido compartidas en la comunidad de usuarios de JaamSim, donde hemos sugerido que se centralice la puesta en común de experiencias docentes (tema que se fijó como cabecera) y en particular que se favorezca y ordene la compartición de ejemplos. Los ejemplos que hemos compartido en la comunidad han resultado indudablemente de interés. En concreto, el ejemplo de un sistema de

fabricación flexible, del que se habla más adelante, ya ha sido recomendado por algunos usuarios para responder a preguntas de otros sobre el modelado de sistemas análogos.

Dado que los estudiantes desarrollan sus propios ejemplos en las clases prácticas y, sobre todo, en los trabajos, nuestra intención es ir aumentando este repositorio inicial, y mejorar su documentación. Esto permitirá que en sucesivas ediciones del curso, en lugar de "partir de cero", algunos estudiantes puedan profundizar o sofisticar casos disponibles, que es una situación con la que frecuentemente se encontrarán en su actividad profesional.

2.4 EJEMPLO DE EJEMPLO

A modo de ejemplo de lo que contiene un ejemplo, tomamos el Sistema de Fabricación Flexible con AGV's. Consta de cinco estaciones de trabajo, cada una con varias máquinas idénticas, a través de las cuales pasan los productos, de diferentes tipos (con diferentes planes de trabajo). El movimiento entre unas estaciones y otras lo hace uno o varios AGV's, y se consideran las alternativas de servicio al siguiente (FIFO) o al más próximo (Nearest). En la carpeta del ejemplo (Teruel, 2017) se encuentra una presentación, la versión de JaamSim con la que se desarrolló, varios modelos con distintas variantes, y archivos y hojas de cálculo con los datos de salida y su análisis. La Figura 1 muestra un pantallazo de dicha carpeta, una hoja de cálculo con resultados, y el modelo, en el que no se ha pretendido hacer una representación "física" del lay-out, sino "funcional": las estaciones se modelan mediante entidades Resource, los tiempos de proceso mediante entidades Delay, y los AGV's mediante entidades de tipo Container que "cargan" una entidad que modela un producto y atraviesan dos entidades Delay, una modelando el tiempo para ir a recoger el producto y otra para modelar el tiempo de llevarlo a su destino. En la Figura 1 tenemos, por ejemplo, tres productos siendo procesados por sendas máquinas en la primera estación, mientras uno espera a que quede una máquina libre. En la estación 3 las cinco máquinas están ocupadas, y tiene otros cuantos esperando (la evolución de la longitud de las colas de las estaciones 2 y 3 se representa dinámicamente en el gráfico de la derecha). Los dos AGV's están ocupados, uno yendo a buscar un producto y otro transportando otro producto a la estación que le corresponde. Los distintos tiempos de proceso y transporte y los detalles de la lógica del modelo están especificados en las diversas distribuciones, asignaciones de atributos, evaluación de expresiones, etc, que normalmente se ocultarían en un modelo de animación, pero en este caso está todo a la vista, pues de lo que se trata es de revisar cómo está construido el modelo, y luego hacer las simulaciones necesarias para analizar y optimizar el sistema. Para facilitar el

análisis en sus primeras fases es muy conveniente la posibilidad de mostrar en la pantalla de animación cuadros de texto y gráficos con los valores de las medidas de prestaciones de interés, en este caso los tiempos de espera (lead times) y sus diversas componentes, la productividad (throughput), la longitud de las colas, las utilizaciones, etc.

3 VALORACIÓN DE JaamSim

Tras una exploración de herramientas disponibles, tanto propietarias como sobre todo de acceso abierto (Dagkakis y Heavey, 2016), seleccionamos JaamSim por tratarse de una aplicación relativamente madura, potente y usable, que se deriva de una amplia experiencia, desde 2002, en proyectos industriales de simulación programada directamente en Java (King y Harrison, 2010). A partir de esta experiencia, sus desarrolladores empezaron a construir una

herramienta que pudiera ser alternativa a los paquetes comerciales (King y Harrison, 2013). Al principio los propios autores consideraban JaamSim especialmente orientada a programadores, que encontrarían ventajas programando en Java y usando JaamSim frente al uso del lenguaje propio de aplicaciones, cuando éste se requería extensivamente, pero reconocían que era todavía insuficientemente versátil y usable para usuarios no programadores. A nuestro juicio, a la vista de la trayectoria seguida desde que la empezamos a usar en 2016, la aplicación ya ha alcanzado, o está alcanzando, el nivel de desarrollo y usabilidad que la hace atractiva también como paquete de simulación alternativo a los comerciales, para usuarios de todo tipo, y ha seguido y sigue mejorando en este sentido.

Siguiendo las recomendaciones de (Law y Kelton, 2000), los puntos a valorar en un paquete de simulación son los siguientes:

- Capacidades generales, incluyendo flexibilidad



Figura 1: Ejemplo de Sistema de Fabricación Flexible con AGV's.
Carpeta, hoja de cálculo con resultados y modelo funcional en JaamSim.

en el modelado, facilidad de uso, rapidez y coste. En esta categoría JaamSim es más que satisfactoria, incluso aventaja a los paquetes comerciales más conocidos en rapidez de ejecución y tamaño de los sistemas que puede manejar, además de, obviamente, en coste. Permite simular múltiples réplicas de diversos escenarios utilizando un número arbitrario de índices en “Multiple Runs”. También tiene la capacidad de modelar subsistemas continuos, útil para simular procesos híbridos como una bodega (proceso continuo hasta llegar al embotellado y empaquetado), aunque no hemos usado esta característica dado que hay otra parte de la asignatura centrada en ella. La facilidad de uso y flexibilidad de modelado son muy destacables, aunque hay margen de mejora, en particular convendrá dotar de capacidades para el modelado jerárquico, necesarias para grandes modelos con reutilización de submodelos (que ahora no puede hacerse en la interfaz gráfica, sí mediante programación), y también mejorar la usabilidad de la edición de expresiones (prevista a lo largo de los próximos meses, aunque en la situación actual se puede trabajar cómodamente con un poco de disciplina, editando fuera de JaamSim las expresiones y cortando-pegando).

- Requisitos informáticos. Son muy moderados, simplemente tener instalado Java. La instalación más conveniente, en cualquier entorno, es directamente descargar y ejecutar un “archivo Java” (.jar). No hemos tenido problemas con Windows (7 a 10) ni Ubuntu, aunque algún estudiante ha detectado fallos en MacOS. Ninguna otra herramienta, y no digamos las de código abierto más académicas, resulta tan fácil de poner en marcha, lo cual es una gran ventaja en general y más en el contexto en que nos movemos, en el que deseamos que los estudiantes trabajen con ella desde el primer día.
- Animación, y gráficos. En esta categoría las capacidades de JaamSim son sobresalientes. La animación, que puede incluir gráficos dinámicos, se puede acelerar con respecto a tiempo real, hacerse todo lo rápida que permita la máquina, u ocultarse para acelerarla aún más. Una característica muy útil, sobre todo en las etapas tempranas de modelado y verificación, es que muchos resultados estadísticos son directamente accesibles “en caliente”, durante la animación, sin tener que esperar a que ésta termine. Además, es muy sencillo incorporar datos y gráficos de interés en la ventana de animación, como se ha ilustrado en el ejemplo.
- Características estadísticas, y salidas. Están disponibles las distribuciones más frecuentes, y bloques estadísticos para facilitar un análisis más que básico de las salidas, que por supuesto se puede/debe completar a partir de datos

exportados, usando otras herramientas específicas. Una característica muy conveniente, para la comparación de alternativas, es la generación de números aleatorios comunes utilizando un único parámetro, “GlobalSubstreamSeed”.

- Soporte y documentación. La documentación (para usuarios y programadores) es suficiente, aunque convendrá incorporar ejemplos de mayor complejidad en algún repositorio bien organizado, como los que nosotros podemos contribuir. El soporte es el típico de una comunidad, a través de un foro, en el que nuestra experiencia durante los últimos meses ha sido extraordinariamente positiva. Seguramente, si la comunidad crece más, habrá una atención menos directa por parte del equipo de desarrollo, pero más rica por parte del resto de usuarios.

Siguiendo las recomendaciones del modelo de calidad para evaluar software educativo libre (Touron *et al.*, 2015), valoraríamos JaamSim positivamente en todas las características que contempla dicho modelo, considerando que conviene seguir mejorando la confiabilidad y comunidad, ambas inter-relacionadas: durante nuestra experiencia como usuarios participando en la comunidad hemos podido detectar algún fallo así como proponer mejoras y nuevas funcionalidades, obteniendo siempre respuesta eficaz y a tiempo.

4 VALORACIÓN DE LA EXPERIENCIA, Y CONCLUSIONES

Consideramos que la experiencia ha cumplido con nuestros objetivos: los estudiantes han podido aprender simulación de eventos discretos trabajando directamente sobre modelos de diversa complejidad, los vistos en clase y otros desarrollados por ellos mismos, con un entorno de simulación fácil de instalar y usar, y a la vez suficientemente potente, sin ningún tipo de limitación. No era nuestro objetivo extraer conclusiones “objetivas”, dado el reducido número de estudiantes en una sola edición del curso. Los resultados de las encuestas de calidad son muy positivos, en línea con los de otras asignaturas o los de anteriores ediciones de ésta, pero tampoco nos parecen significativos, por su carácter genérico y el reducido tamaño de la muestra. Para nuestra valoración u opinión positiva nos basamos en:

- La realimentación informal de los estudiantes, pues por desgracia ha sido imposible conseguir una realimentación más formal, mediante encuestas de satisfacción y valoración del esfuerzo requerido sobre las actividades específicas, que se les pidió que respondieran de forma voluntaria. Aunque en algunos casos

requería algo de trabajo extra, éste era mínimo, así que pensamos que la baja participación es más bien sistémica.

- La observación de su trabajo, cada vez más autónomo e interesado, especialmente desde el momento en que disponían del enunciado de su trabajo. Pronto dejaron de usar los ordenadores del laboratorio en las sesiones prácticas para usar los propios, cosa que también podían hacer en clase, y eso permitió disolver las fronteras entre las clases “de teoría” y “de prácticas”, a menudo incómodas e inconvenientes. Esta observación nos sugiere adelantar el curso que viene la entrega de los enunciados de trabajo, de modo que casi desde el principio puedan y quieran ponerse a trabajar por su cuenta.
- La calidad de los trabajos prácticos realizados, cubriendo en general todas las fases de un proyecto de simulación, desde el planteamiento y definición de alcance y objetivos hasta el análisis estadístico de resultados y planteamiento de recomendaciones, pasando por el desarrollo de modelos y animaciones. Estos son todos los aspectos requeridos en un proyecto de simulación profesional, según (Altiok y Melamed, 2007; Law y Kelton, 2000). Varios grupos obtuvieron la máxima calificación, al haberlos cubierto todos excelentemente, a partir de un enunciado del tipo “blueprint” tomado directamente de los “Arena Contest Problems” de (Kelton *et al.*, 2015). En ediciones anteriores sólo se cubrían parcialmente, y sobre casos más simples y menos variados. Gracias a este tipo de evaluación, exigente e integradora, se ha considerado que esta asignatura contribuye a alcanzar la competencia transversal “Capacidad para combinar los conocimientos generalistas y los especializados de Ingeniería para generar propuestas innovadoras y competitivas en la actividad profesional”, en un proyecto de “Planificación de las competencias transversales en los Grados de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura” realizado este mismo curso.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo recibido del Vicerrectorado de Política Académica de la Universidad de Zaragoza, a través del proyecto PIIDUZ-16-031.

Referencias

- Altiok, T. y Melamed, B. (2007). *Simulation Modeling and Analysis with Arena*. Academic Press.
- Brown, P., Roedeiger III, H. y McDaniel, M. (2014). *Make It Stick. The Science of Successful Learning*. Harvard University Press.
- Conole, G. (2013). Los MOOCs como tecnologías disruptivas: estrategias para mejorar la experiencia de aprendizaje y la calidad de los MOOCs. *Campus Virtuales. Revista Científica Iberoamericana de Tecnología Educativa*, 2(2), 16-28.
- Dagkakis, G. y Heavey, C. (2016). A review of open source discrete event simulation software for operations research, *Journal of Simulation* (10), 193-206.
- Fritzon, P. (2015). *Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 3.3: A Cyber-Physical Approach*. Wiley.
- JaamSim Development Team (2017). *JaamSim: Discrete-Event Simulation Software (v.2017-03)*. *JaamSim User Manual (v.2016-21)*. Abierto en línea en <http://jaamsim.com/>
- Kelton, D., Sadowski y R., Zupick, N. (2015). *Simulation with Arena*. McGraw-Hill.
- King, H. y Harrison, H. (2010). Discrete-event simulation in Java: a practitioner's experience, *Proc. Conference on Grand Challenges in Modeling & Simulation*, 436-441.
- King, H. y Harrison, H. (2013). Open-source simulation software: JaamSim, *Proc. 2013 Winter Simulation Conference*, 2163-2171.
- Law, A. y Kelton, D. (2000). *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill.
- Leemis, L. y Park, S. (2006). *Discrete-Event Simulation: A First Course*. Pearson.
- Martín, C., Urquía, A. y Dormido, S. (2005). Modeling of Interactive Virtual Laboratories with Modelica, *Proceedings of the 4th International Modelica Conference*, 159-168.
- Mattsson, S., Elmqvist, H. y Otter, M. (1998). Physical system modeling with Modelica. *Control Engineering Practice* (6), 501-510.
- Teruel, E. (2017). *Simulación de Sistemas Dinámicos*. Abierto en línea, a través de Internet Archive <https://archive.org/details/Teruel2017SimulacionSistemasDinamicos>
- Tiller, M. (2014). *Modelica by example*. Abierto en línea en <http://book.xogeny.com>
- Tourón, M., Plaza, I., Igual, R., Sainz, E. y Arcega, F. (2015). Modelo de calidad para evaluar software educativo libre, *Proc. III Congreso Internacional sobre Aprendizaje, Innovación y Competitividad*, 585-590.

RED NEURONAL AUTORREGRESIVA NO LINEAL CON ENTRADAS EXÓGENAS PARA LA PREDICCIÓN DEL ELECTROENCEFALOGRAMA FETAL

R.M. Aguilar¹, J.M. Torres², C.A. Martín³

Department of Computer and Systems Engineering, University of La Laguna
38200 La Laguna (Tenerife), España.

¹raguilar@ull.edu.es, ²jmtorres@ull.edu.es, ³carlos.martin.galan@iac.es

Resumen (12 ptos, negrita)

Este artículo describe un algoritmo simple y robusto para la simulación de señales biomédica usando una Red Neuronal Autorregresiva No Lineal con Entradas Exógenas (NARX- Nonlinear Autorregressive Network with Exogenous inputs). La NARX puede ajustarse para sistemas dinámicos cuya salida depende tanto de la entrada recibida como del estado en que se encuentre el sistema. Por lo que es especialmente adecuada para la estimación de los componentes cuasi-periódico de las señales fisiológicas, tales como el ElectroEncefalograma (ECG). La validez y rendimiento del método descrito se confirman a través de experimentos sobre datos reales obtenidos de la base de datos de acceso público PhysioNet.

Palabras Clave: Redes Neuronales, series temporales, Electrocardiograma Fetal

1 INTRODUCCIÓN

Una señal es un medio de transmisión de información, cuya adquisición permite obtener información sobre la fuente que la generó. En el caso de señales biomédicas, las fuentes son los diferentes sistemas biológicos. Las señales biomédicas se utilizan fundamentalmente para extraer información del sistema biológico bajo estudio. El proceso completo de extracción de la información puede ser tan sencillo como la estimación de la frecuencia cardíaca media de un paciente a través del "pulso" o tan complejo como el análisis de la estructura interna de los tejidos blandos mediante un sofisticado equipo de tomografía computarizada o resonancia magnética. La definición de "señal biomédica" es muy amplia.

Las señales biológicas pueden ser clasificadas en dos grupos principales: las señales determinísticas y las estocásticas (o estadísticas). Tal como un corazón

que late o la respiración genera señales que también son repetitivas. El grupo determinístico se subdivide en señales periódicas, casi periódicas y transitorias. Las señales estocásticas se subdividen en señales estacionarias y no estacionarias [1]

Es importante destacar que en muchos de los estudio biomédicos se utilizan datos no experimentales. Los datos no experimentales se recogen mediante la observación del mundo real de una manera pasiva. En este caso los datos no son el resultado de experimentos controlados. Los datos experimentales se recogen a menudo en entornos de laboratorio, como ocurre en las ciencias naturales. En las series temporales, los datos son observaciones de una variable a lo largo del tiempo. Por ejemplo: la observación en el paciente de ciertas variables vitales como ECG. El orden cronológico de las observaciones proporciona información potencialmente importante. En consecuencia, en una serie temporal la ordenación de las observaciones es relevante. No se puede asumir que los datos de series temporales sean independientes a través del tiempo. La mayoría de las series biológicas se relacionan con sus historia reciente.

Un estudio de estas señales nos informa sobre una planificación racional que nos permitan prever los sucesos del futuro que probablemente vayan a ocurrir. La previsión, a su vez, se suele basar en lo que ha ocurrido en el pasado. Se tiene pues un nuevo tipo de inferencia estadística que se hace acerca del futuro de alguna variable o compuesto de variables basándose en sucesos pasados. La técnica más importante para hacer inferencias sobre el futuro con base en lo ocurrido en el pasado, es el análisis de series de tiempo.

Son innumerables las aplicaciones que se pueden citar, en distintas áreas del conocimiento, tales como, en economía, física, geofísica, química, electricidad, en demografía, en marketing, en telecomunicaciones, en transporte, etc. Si nos centramos en la biomedicina, surge en muchas ocasiones el modelado y simulación de una o varias señales (series temporales) para estudiar su comportamiento. Por lo tanto, seremos capaces, entre otros ejemplos, de

estudiar el ECG, ECG fetal (FECG), En este trabajo, presentamos la red neuronal NARX como herramienta para modelar señales biomédicas reales procedentes de la base de datos PhysioNet [2][3]. En la bibliografía existen varias investigaciones donde se ha utilizado la red NARX en distintas aplicaciones de la industria, sin embargo su aplicación al modelado de señales fisiológicas es escaso.

Este artículo está organizado en tres secciones. A continuación se describe las redes neuronales autorregresivas no lineal con entrada exógena. Se indica cómo se ha configurado y entrenado para del electroencefalograma fetal (FECG). En el apartado 3 se muestran los resultados obtenidos a partir de las señales reales existentes en la base de datos pública PhysioNet. Dada la importancia de la detección de los picos R (R-peak) en los FECG, en el apartado 4 se muestra la obtención de dichos picos en las señales predichas. Finalmente se muestran las conclusiones del trabajo.

2 MÉTODO

2.1 RED NEURONAL AUTORREGRESIVA NO LINEAL CON ENTRADAS EXÓGENAS (NARX)

El tipo de red neuronal de series de tiempo utilizada para este trabajo es la red NARX: Autorregresiva No Lineal con Entradas Exógenas. El modelo NARX está basado en el modelo lineal ARX (modelo dinámico lineal de autoregresión con variables exógenas) de difundido uso en series de tiempo. La principal ventaja de la red NARX sobre una red feed-forward (hacia delante) es que permite ganar grados de libertad al incluir la predicción de un período como dato en períodos siguientes, resumiendo información de las variables exógenas, permitiendo incluir menos retrasos de las mismas y resumiendo el número de parámetros “a estimar”. La ecuación 1

muestra la expresión matemática de la red NARX, que está definida por una función desconocida (f), la cual es el objetivo a obtener usando esta técnica de identificación; a partir de la entrada $\{x\}$ y las salidas anteriores del sistema $\{y\}$

Donde $y(t)$ es la respuesta predicha del Sistema en el instante actual (t). El vector $\{y\}$ es la salida anterior del sistema retardada N instantes de tiempo. Y el vector $\{x\}$ es la entrada actual del sistema en el instante (t) y las entradas anteriores retardadas M instantes de tiempo.

NARX equivale a un sistema perceptron multicapa como el que se muestra en la figura 1. En la entrada se tienen tantas neuronas como datos de entradas utilizamos, considerando que los datos de entrada son las M entradas anteriores y la N salidas anteriores del sistema. Dependiendo de la complejidad de la función a ajustar, se determinará el número de capas ocultas ($1, 2, \dots, p$) y el número de neuronas en cada una de dichas capas (z_1, z_2, \dots, z_p) que son multiplicados por los pesos $\{W\}$ y se suma las bias $\{b\}$. La capa de salida estará formada únicamente por una neurona que nos dará la salida del sistema buscada ($y=f(t)$). Los vectores de entrada ponderados se introducen en la función de activación no lineal, la cual puede tomar una variedad de formas diferentes, de manera que se puede realizar una correlación no lineal entre la entrada y la salida. La función de activación suele tener la forma de una función tangencial hiperbólica o polinomios de cierto grado. Las diferentes funciones de activación utilizadas en la capa oculta generarán diferentes valores para los pesos y las bias en un sistema dado, de modo que la elección de la función de activación es bastante libre. El vector de sesgo $\{b\}$ también ayuda a reflejar el posible efecto de valor medio. Finalmente, los vectores activados son enviados a la capa de salida, donde se realiza el simple proceso de suma ponderada de todos los vectores junto con el valor de sesgo adicional, dicho valor pasa por la función de activación de la capa de salida.

$$y(t) = f(\{y\}, \{x\}) = f(y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-N), x(t), x(t-1), \dots, x(t-M))$$

Ecuación 1.- Expresión matemática de la red NARX

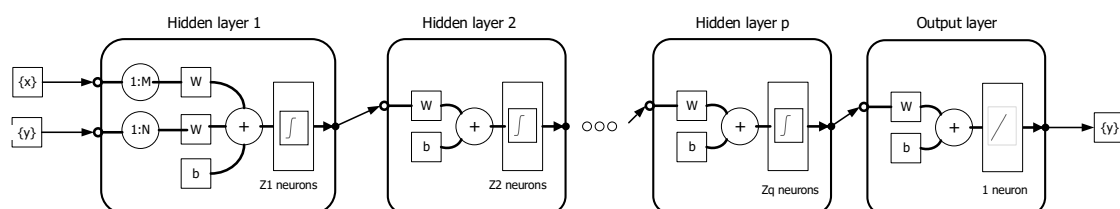


Figura 1.- Esquema de la red NARX

La ecuación 1 mapea la entrada a la salida del sistema de una manera implícita, de modo que una vez que se determinan los parámetros de la red, se dice que el sistema está completamente identificado.

Los parámetros de red, es decir, pesos y sesgos, se pueden determinar mediante el llamado entrenamiento supervisado, que emplea los conjuntos de datos preparados de entradas y salidas del sistema.

En el entrenamiento supervisado, los parámetros de la red se determinan de tal manera que el cuadrado medio de la salida predicha de la red y la salida verdadera del sistema sea lo más pequeño posible dentro de los grados de libertad que la red mantiene. Esta evolución adaptativa de los parámetros de red se logra normalmente utilizando el método de descenso de gradiente, que obliga a los parámetros de la red a moverse en la dirección del error cuadrático medio decreciente entre la predicción y el objetivo.

2.2 NARX EN LA PREDICCIÓN DEL ELECTROENCEFALOGRAMA FETAL

El electrocardiograma (ECG) es una importante herramienta utilizada por el médico para identificar anomalías en la actividad del corazón humano [4]. Del mismo modo, el ECG fetal (FECG) puede detectar problemas en la actividad cardíaca fetal. La monitorización de la frecuencia cardíaca fetal (FHR) debe ser un procedimiento de rutina para la evaluación del bienestar del feto, proporcionando una referencia importante para el tratamiento clínico durante el embarazo. En uso de técnicas invasivas de medición FECG, los electrodos se insertan dentro del cuerpo, esto puede causar la ruptura de las membranas, lo que es peligroso tanto para la vida del feto como de la madre. Por lo tanto, es necesario utilizar métodos no invasivos, en esta técnica se toman lecturas coetáneas del abdomen de las mujeres embarazadas que es un mecanismo seguro tanto para la madre como para el feto. Sin embargo estas lecturas son en gran parte distorsionadas por diversos tipos de ruidos, entre los cuales el más importantes es la interferencia del electrocardiograma materno (MECG) que es 5-1000 veces mayor en amplitud que FECG [5]. El ECG fetal y materno tiene eventos morfológicamente similares con rango de frecuencia similar, lo que complica el uso de filtros en frecuencia para la extracción del FECG. En este trabajo, vamos a entrenar una red NARX para predecir el FECG a partir de las señales recogidas en el abdomen materno.

Los pares de entrenamiento estarán formado por el vector de entrada $\{x\}$ compuesto por las señales registradas desde el abdomen de mujeres

embarazadas usando electrodos superficiales. Como vector de salida $\{y\}$ el FECG correspondiente obtenido del feto. Se entrena sobre un individuo y se obtiene una red que puede predecir el FECG a partir de las señales obtenidas del abdomen materno para ese individuo.

Se han utilizado señales reales disponibles en la base de datos en abierto PhysioNet. La base de datos incluye 4 señales recogidas del abdomen de la madre y la señal del FECG registrada desde el cuero cabelludo del feto. Estos registros de PhysioNet consisten en un ECG fetal multicanal de 10 minutos registrado de cinco mujeres diferentes, entre 38 y 41 semanas de gestación. Cada registro incluye cuatro registros de ECG abdominal y un ECG de cuero cabelludo fetal simultáneamente registrado. La frecuencia de muestreo es de 1KHz con resolución de 16 bits. Registros de cinco mujeres se denominan como, r01, r04, r07, r08, r10 [6]. La figura 2 muestra el registro r10 de base de datos que es el conjunto de señales elegidas para el entrenamiento de la red.

En la Figura 3 se muestra los pasos en la detección en primer lugar el FECG, para en un segundo paso determinar la detección de pico R a partir de la señal predicha.

El primer paso, para inferir el FECG a partir de las señales recogidas del abdomen de la madre, es entrenar la red neuronal. La estructura de la NARX elegida se muestra en la figura 4, y está formada por 3 capas ocultas cada una de ellas con 7 neuronas. El número de neuronas de la capa oculta ha sido determinado por un procedimiento de prueba y error. Las funciones de activación que suelen tener buenos resultados son: para las capas ocultas la tangente hiperbólica y para la capa de salida la pureline (función de transferencia lineal). La entrada es el vector formado por las 4 señales registradas en el abdomen de la madre y el estado del sistema, que viene dado por los últimos 20 valores anteriores de salida de la red. Las grandes diferencias en los valores absolutos de las diferentes entradas pueden complicar el proceso de aprendizaje en la red [7], por ello las entradas y salidas son normalizadas. Los datos de entrenamiento son las 10000 muestras del registro r10, donde se ha seleccionado un 80% para Entreno, 10% para validación y 10% para test.

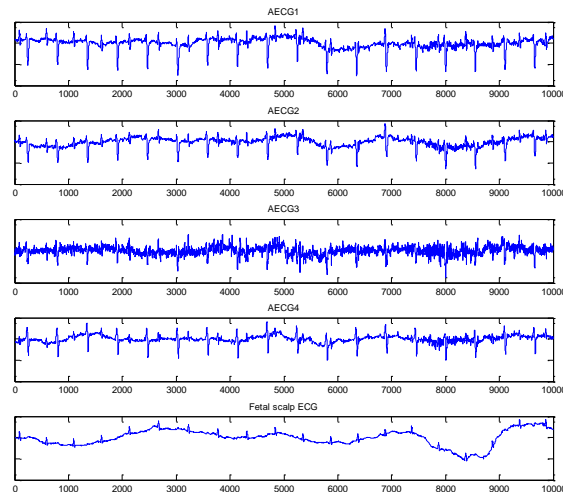


Figura 2.-PhysioNet database record r10.

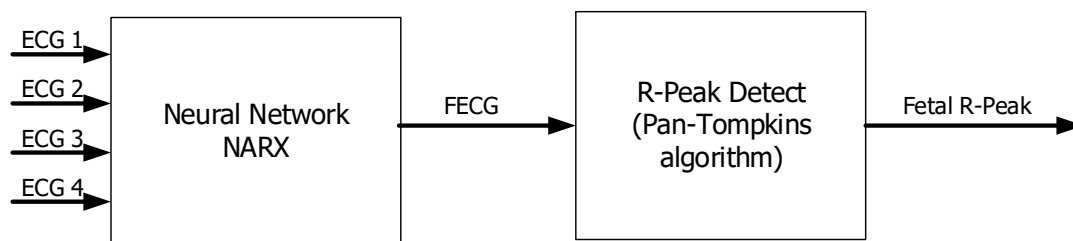


Figura 3.-Framework for FECG extraction and R-peak detection.

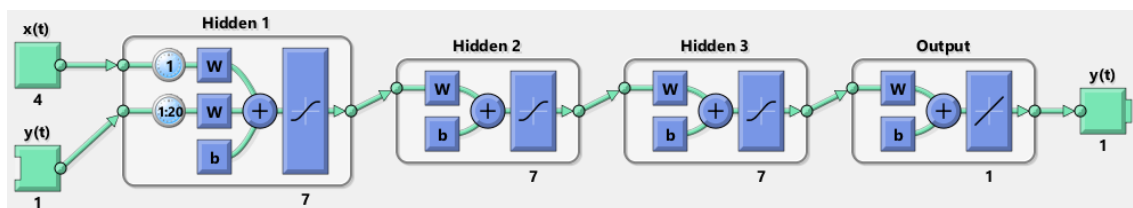


Figura 4.-Red Neuronal NARX para la predicción del ECG Fetal

3 RESULTADOS

El rendimiento de la red entrenada se puede observar en la figura 5. Para determinar la eficacia del método descrito para la estimación de FECG a partir de la señal de ECG abdominal, se han utilizados los registros existentes en la base de datos PhysioNet [16]. Para ello se ha simulado el modelo obtenido al entrenar el registro r10 con el resto de individuos existentes en la base de datos (archivos r01, r04, r07, r08). El resultado ha sido comparado con el FECG obtenido en el cuero cabelludo del feto correspondiente.

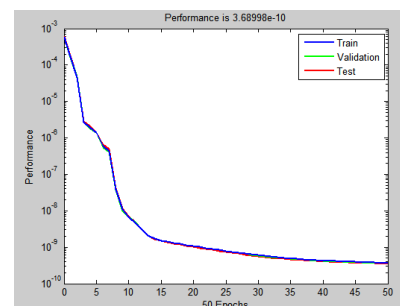


Figura 5.- Evolución del rendimiento en el entreno de la red

Para evaluar el rendimiento de estas predicciones, se utilizó la Raíz cuadrada del error cuadrático medio (Root Mean Square Error -RMSE) y coeficiente de determinación (R^2) medidas (Vasileva-Stojanovska, 2015). RMSE y R^2 se definen como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SR_p(i) - SR_o(i))^2}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (SR_o(i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n SR_o(i))^2}{\sum_{i=1}^n (SR_p(i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n SR_p(i))^2}$$

DONDE SR_o y SR_p son el FECG observado y el predicho. Teóricamente, un modelo de predicción es aceptado como excelente si el RMSE está cerca del cero y el R^2 próximo a 1. El ajuste realizado con la NARX entrenada se muestra en la figura 6, que indica una buena aproximación. Evidentemente los mejores resultados se consiguen con el registro con el que fue entrenada la red (r10). Asimismo, los peores resultados son alcanzados en el registro r08 que tiene un alto nivel de ruido y en diferentes experimentos ha sido descartado [8]. Sin embargo, la red entrenada es capaz de extraer el FECG con la precisión adecuada para determinar los picos-R para todos los registros.

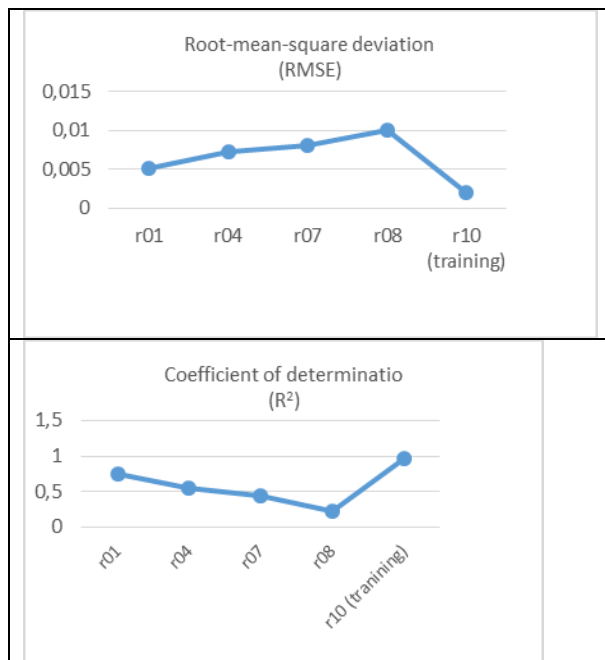


Figura 6.- Rendimiento del modelo NARX para predicción del FECG

4 DETECCIÓN DEL PICO R EN EL FECG

La determinación del pico R en el electroencefalograma fetal es un elemento fundamental para el médico. Por lo tanto, es importante determinar si es posible la obtención de dicho pico R a partir de las señales FECG predichas de la red neuronal NARX entrenada. Cuando los componentes fetales son muy débiles o el ruido de fondo es fuerte, los errores de detección de pico R fetal es frecuente cuando se utilizan métodos como la técnica de correlación, el filtro combinado, la

transformación wavelet, la separación de fuentes ciegas (BSS). En Zheng Wei et al [9] los autores han observado que en registros existentes en la base de datos PhysioNet sobre FECG estimados, no se pudieron encontrar a simple vista la repetición de complejos QRS fetales en las formas de onda abdominales. Los picos R de los FECG en las señales residuales correspondientes son demasiado débiles para ser detectados, resultando por lo tanto un fracaso de la estimación de ECG fetal.

Sin embargo, con la red NARX tenemos una herramienta para inferir el FECG a partir de los AECG de la madre, aunque la relación señal ruido sea baja. Para validar este hecho, se ha simulado con la red entrenada los registros existentes en PhysioNet (r01, r04, r07, r08) obteniendo los FECG respectivos. El siguiente paso se ha detectado los picos R usando el algoritmo Pan-Tompkins. Los resultados para los 4 registros se muestran en la figura 7.

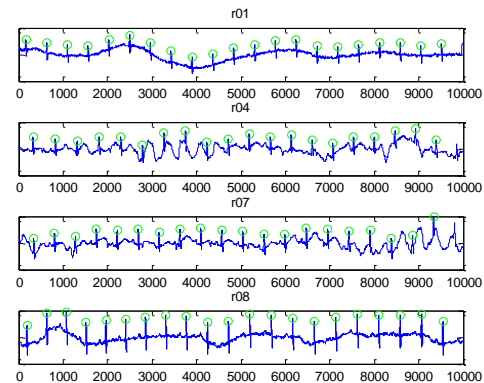


Figura 7.- Picos R del FECG simulado con la red NARX a partir de los AECG

4 CONCLUSIONES

Este trabajo desarrolla la predicción de la serie temporal que corresponde al Electrocardiograma fetal (FECG) a partir del electroencefalograma (ECG) abdominal (AECG). Estas señales han sido registradas a partir de electrodos superficiales lo que proporciona métodos no invasivos en la detección del FECG. Se determinan las siguientes conclusiones: NARX, es una red neuronal artificial que permite la identificación de sistemas no lineales y que se ajusta como modelo para la predicción de series temporales. Por lo tanto son de utilidad en el estudio de señales biomédicas.

La metodología ha sido comprobada mediante la predicción del FECG a partir de las señales observada en el abdomen de la madre. Los resultados han sido adecuados, incluso en señales con baja relación señal/ruido. Sin embargo, sería conveniente tener un mayor número de individuos de validación. El FECG obtenido a partir de la simulación de la red NARX es lo suficientemente preciso que permite

obtener los picos-R con algoritmos como el de Pan-Tompkins.

Referencias

- [1] Van Bommel, J., and Musen, M., 1997, Handbook of medical informatics, 2nd Edition, Houten/Diagem: Springer
- [2] Jezewski J, Matonia A, Kupka T, Roj D, Czabanski R. Determination of the fetal heart rate from abdominal signals: evaluation of beat-to-beat accuracy in relation to the direct fetal electrocardiogram. Biomedical Engineering/Biomedizinische Technik 2012; 57(5):383-394. doi:10.1515/bmt-2011-0130.
- [3] Matonia A, Jezewski J, Kupka T, Horoba K, Wrobel J, Gacek A. The influence of coincidence of fetal and maternal QRS complexes on fetal heart rate reliability. Medical & Biological Engineering & Computing 2006;44(5):393-403.
- [4] M. Rangayyan, "Biomedical Signal Analysis: A case study Approach," IEEE Press Series in Biomedical Engineering. John Wiley & Sons, Singapore, 2002.
- [5] S. Ravindrakumar, K. Bomman Raja, "Fetal ECG Extraction and Enhancement in Prenatal Monitoring-Review and Implementation Issues," IEEE conference 2010.
- [6] Goldberger AL, Amaral LAN, Glass L, Hausdorff JM, Ivanov PCh, Mark RG, Mietus JE, Moody GB, Peng CK, Stanley HE. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals. Circulation 101(23):e215-e220; 2000; doi: 10.1161/01.CIR.101.23.e215
- [7] J.M. Alonso, F. Alvarruiz, J.M. Desantes, L. Hernández, V. Hernández, G. Moltó, Combining neural networks and genetic algorithms to predict and reduce diesel engine emissions, IEEE Trans. Evolut. Comput., 11 (1) (2007), pp. 46–55
- [8] Sonal Nikam, Shankar Deosarkar, Fast ICA based technique for non-invasive fetal ECG extraction, Conference on Advances in Signal Processing (CASP), 2016, DOI:10.1109/CASP.2016.7746138
- [9] Zheng Wei, Wei Xueyun, Zhong Jian jian, Liu Hongxing, Noninvasive fetal ECG estimation using adaptive comb filter, Computer Methods and Programs in Biomedicine, Volume 112, Issue 1, October 2013, Pages 125-134, ISSN 0169-2607, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cmpb.2013.07.015>.

ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MATERIA EN REACTORES RACEWAYS

M. Barceló Villalobos
mbv001@ual.es

J. L. Guzmán, F.G. Acien Fernández, I. Martín Cara y J.A. Sánchez Molina
joguzman@ual.es, facien@ual.es, ismael.martin.cara@gmail.com, jorgesanchez@ual.es

Resumen

El presente trabajo busca mejorar la productividad de los reactores raceway mejorando el diseño y control automático de este tipo sistemas. Para ello se llevaron a cabo ensayos en un reactor de 100 metros cuadrados, equipado con foso donde se propicia la absorción de CO₂ y desorción de O₂, modificando el caudal de gas (CO₂ o aire) suministrado al foso. Se evaluó la relevancia de cada una de las secciones que constituyen el reactor raceway en la transferencia de materia global del sistema, así como la transferencia de oxígeno en el foso a diferentes caudales de aire. Este trabajo muestra cómo la aireación puede afectar al coeficiente de transferencia de materia y cuáles son las condiciones óptimas de operación según el diseño del reactor y la especie de microalga utilizada.
Palabras Clave: Microalgas, raceways, optimizar, producción.

1 INTRODUCCIÓN

Los fotobiorreactores raceways han sido utilizados desde los años 50 para la producción industrial de microalgas. La principal ventaja de este tipo de reactores es su simplicidad y el bajo coste de construcción. Sin embargo, tienen algunos problemas relacionados con su baja productividad, contaminación de los cultivos y el escaso control de las condiciones de cultivo.

Los beneficios en la productividad de la biomasa logrados mediante la mejora de la capacidad de transferencia de materia aparecen en [4]. Además, para mejorar la productividad de estos sistemas y reducir los costos de producción por unidad de biomasa, es necesario garantizar una producción eficiente y controlada. Para conseguirlo, es obligatorio mejorar el diseño del fotobiorreactor, así como las condiciones de operación, especialmente la capacidad de transferencia de materia. El objetivo principal del trabajo realizado es desarrollar una metodología para la medición en línea de los coeficientes de transferencia de materia y cuantificar la relevancia de la mejora de la capacidad de transferencia de materia en el rendimiento del sistema.

2 MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 MATERIAL

2.1.1 Microorganismo

La cepa microalga utilizada fue *Scenedesmus almeriensis* (CCAP 276/24), a pH 8.0 controlado por un controlador basado en eventos.

2.1.2 Reactor raceway y condiciones operacionales de cultivo

El reactor raceway utilizado fue el mismo que en [2] (Figura 1). El pH, la temperatura y el oxígeno disuelto se midieron con sondas Crison (Instrumentos Crison, España), conectadas a una unidad de control-transmisor MM44 (Crison Instruments, España), y el software de adquisición de datos (Labview, National Instruments) para tener un monitoreo y control completo de la instalación. El caudal de gas de entrada al reactor se midió con un caudalímetro (SMC, Japan).

Los experimentos se realizaron en modo semicontinuo a una altura de cultivo de 0,15 m. Se utilizó el medio Mean & Myers preparado a partir de fertilizantes en lugar de compuestos químicos puros. El medio de cultivo no se esterilizó, ni se filtró, antes de introducirlo en el reactor.

En la fase de inoculación se utilizaron 3000 L de cultivo procedente de un fotobiorreactor tubular. Seguidamente, se operó en discontinuo durante tres días, hasta obtener una concentración de biomasa de 0,4 g L⁻¹. Después, el reactor fue operado en modo semicontinuo a 0,4 día⁻¹. Para operar en modo semicontinuo, diariamente se recogió un volumen de cultivo de 6,0 m³ y se reemplazó con medio fresco, realizando esta operación desde las 8:00 a las 12:00. La operación semicontinua se mantuvo hasta alcanzar estado estacionario, en el que la concentración de biomasa se mantiene ya constante. Sólo se utilizaron los datos correspondientes a las condiciones de estado estacionario. La evaporación en el interior del reactor se compensó diariamente añadiendo medio fresco, además del volumen de medio fresco utilizado para la operación semicontinua del reactor.

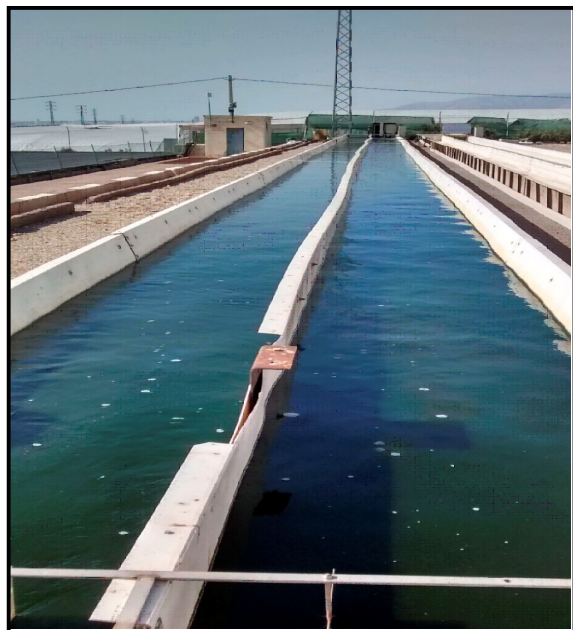


Figura 1. Detalle del lazo del reactor

El carbono requerido por el cultivo fue suministrado mediante inyecciones de CO_2 a demanda, usando un controlador de pH basado en eventos, y aportando el gas rico en CO_2 en el foso en condiciones óptimas (Figura 2). Además, se proporciona NaHCO_3 una vez por semana para mantener la alcalinidad del medio en su valor óptimo 7 mM.



Figura 2. Detalle del foso del reactor

2.1.3 Diseño experimental

Se ensayaron seis caudales de gas en el foso (0, 100, 160, 185, 200 y 350 L min^{-1}) para determinar la correlación entre el caudal de gas inyectado y el coeficiente de transferencia de biomasa.

El reactor fue operado en las mismas condiciones ambientales de radiación solar y temperatura, así como operacionales de concentración de biomasa y tasa de dilución, a lo largo de todos los ensayos. La radiación solar media diaria fue de $600 \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, la concentración de biomasa de $0,39 \text{ g L}^{-1}$, y las células no presentaron estrés fotosintético alguno ($\text{Quantum Yield}=0,69$).

La inyección de aire se llevó a cabo mediante un burbujeador de burbuja fina que permite trabajar con burbujas de tamaño pequeño, tal y como recomienda [4].

La inyección de aire se mantiene de forma constante al caudal prefijado, y solo se detiene cuando se demanda CO_2 . Respecto a la demanda de carbono, ésta fue suplida mediante la inyección de CO_2 puro.

2.2 MÉTODOS

2.2.1 Caracterización de la transferencia de materia

La concentración de oxígeno disuelto se midió en tres lugares diferentes (palas, foso y lazo). La variación de la concentración de oxígeno disuelto con el tiempo corresponde a una función donde el coeficiente de transferencia de materia (kla) y la fuerza impulsora estaban relacionadas (1), siendo kla el coeficiente de transferencia de materia (h^{-1}), $[\text{O}_2]$ es la concentración de oxígeno disuelto (mg L^{-1}), $[\text{O}_2^*]$ es la concentración del oxígeno disuelto en equilibrio con la atmósfera (mg L^{-1}) y t es el tiempo (s).

$$d[\text{O}_2]/dt = kla \times ([\text{O}_2^*] - [\text{O}_2]) \quad (1)$$

Si se integra la ecuación (1) entre los tiempos cero y t , el coeficiente de transferencia de materia puede calcularse como:

$$\ln([\text{O}_2^*] - [\text{O}_2]) / ([\text{O}_2^*] - [\text{O}_2]) = K la \times t \quad (2)$$

La concentración del oxígeno disuelto en equilibrio con el aire en las condiciones de los ensayos es de 9 mg L^{-1} , tal y como se propone en la Ley de Henry [2].

El coeficiente de transferencia de materia (kla) se determinó inyectando diferentes caudales de gas a través del foso y midiendo las concentraciones de oxígeno disuelto (mg L^{-1}) resultantes en los diferentes lugares propuestos (palas, foso y canal).

2.2.2 Caracterización de la producción de oxígeno

Para determinar la producción de oxígeno (PO_2 , $\text{mg L}^{-1} \text{ h}^{-1}$) a partir de las medidas de concentración de oxígeno disuelto es necesario conocer los coeficientes

de transferencia de materia (TM) en todo el reactor (3)-(4)

$$d[O_2]/dt = PO_2max + TM_{Canal} + TM_{Palas} + TM_{Foso} \quad (3)$$

$$TM = KLa \times [(O_2) - (O_2^*)] \quad (4)$$

Una vez conocido el valor de concentración de oxígeno máxima que la especie soporta (O_2), se podría saber cuál es el caudal de gas que se debe utilizar en cada caso, para lograr un coeficiente óptimo de transferencia de masa (kla) (5).

$$Kla = a \times [Ugr]^b \quad (5)$$

$$Ugr = (\text{caudal de gas}) / (\text{sección del foso}) \quad (6)$$

Donde Kla es el coeficiente de transferencia de materia (h^{-1}) y Ugr es el caudal de gas inyectado ($m^3 s^{-1}$) en la sección del foso (m^2).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una de las principales variables que afectan a la fotosíntesis es el oxígeno disuelto tal como se ha comentado previamente. La optimización de la producción en reactores raceway pasa por evitar la acumulación del oxígeno generado por fotosíntesis, ya que puede inhibir el metabolismo o dañar el cultivo si se acumula en exceso [6]. Se ha demostrado que cuando éste es superior al 250% ($22,5 \text{ mg L}^{-1}$), la tasa de fotosíntesis decae exponencialmente. Debido a eso, la desorción del oxígeno del sistema debe ser una prioridad.

En [4] se sugiere que la capacidad de transferencia de materia del reactor está directamente relacionada con el caudal de gas inyectado en el foso, para así satisfacer las necesidades tanto de aporte de carbono como de eliminación de oxígeno del sistema.

En primer lugar, se midió la acumulación de oxígeno disuelto (Fig. 3) en un reactor de 100 m^2 , durante 24 horas funcionando en modo semicontinuo. Los datos muestran que se alcanza un máximo de oxígeno disuelto de 19 mg L^{-1} , determinándose dicho valor en la posición anterior y posterior a las palas de impulsión cuando la irradiancia era de $1233 \mu\text{E m}^{-2}$. La concentración de oxígeno disuelto después del foso disminuye debido a que éste se encuentra prácticamente en oscuridad así como a la inyección continua de aire.

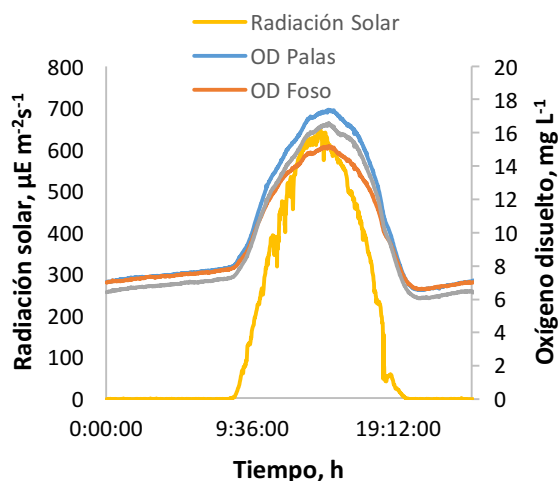


Figura 3. Oxígeno disuelto (mg/L) en 24 horas

Estudios previos con diversas microalgas han demostrado que el aumento de la tasa de aireación para mejorar la eliminación de oxígeno permite mejorar la productividad del cultivo pero si el caudal aportado es excesivo se puede producir daño cuando la turbulencia generada es demasiado intensa [3].

Los datos aquí reportados muestran que la transferencia de materia en el foso es la más significativa de todo el reactor, mientras que en el lazo dicha capacidad de transferencia es muy baja (Fig. 4). La elevada capacidad de transferencia en el foso es debido al uso de difusores de burbuja fina, lo cual permite alcanzar un alto valor del coeficiente de transferencia de materia [6].

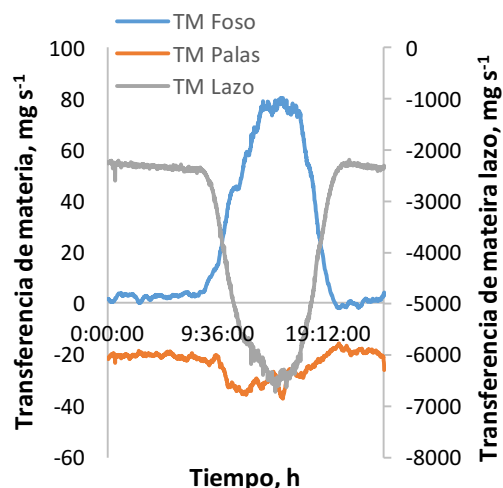


Figura 4. Transferencia de materia en el reactor (palas, foso, lazo)

Análisis anteriores han demostrado que el coeficiente de transferencia de materia puede ser suficientemente

alto si la mezcla entre gas y líquido es adecuada, lo cual ocurre únicamente en las secciones del foso y de las palas, con valores de hasta 90 y 160 h⁻¹ [6].

Con el objetivo de cuantificar la influencia del caudal de gas en la capacidad de transferencia de materia del reactor, se realizaron experimentos manteniendo el reactor en condiciones de estado estacionario, pero modificando el caudal de aire aportado en el foso. Los resultados obtenidos muestran como el coeficiente de transferencia de materia (kla) en el foso aumenta exponencialmente con el caudal de aire inyectado (Fig. 5).

Finalmente, cabe decir que tanto el diseño como la operación óptima de cualquier reactor requiere un conocimiento en detalle del sistema, así como disponer de modelos matemáticos que lo representen satisfactoriamente [5]. En este trabajo se propone un modelo empírico (Fig.6) como herramienta a utilizar a modo de medidor en línea (5), resultando en:

$$Kla = 31080 Ugr - 14.032$$

Cabe destacar que este modelo sólo es válido para concentraciones de oxígeno que van en el rango de 150 a 250% (datos no mostrados).

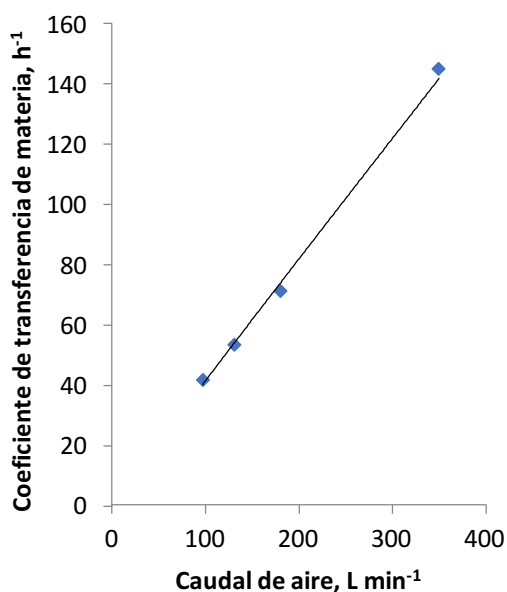


Figura 5. Análisis del coeficiente de transferencia de materia a distintos caudales de aire

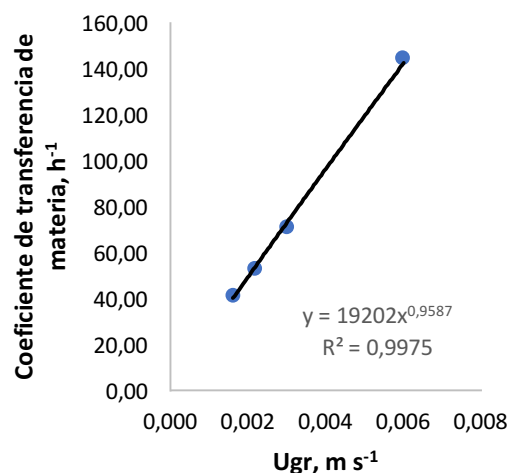


Figura 6. Ajuste empírico del coeficiente de transferencia

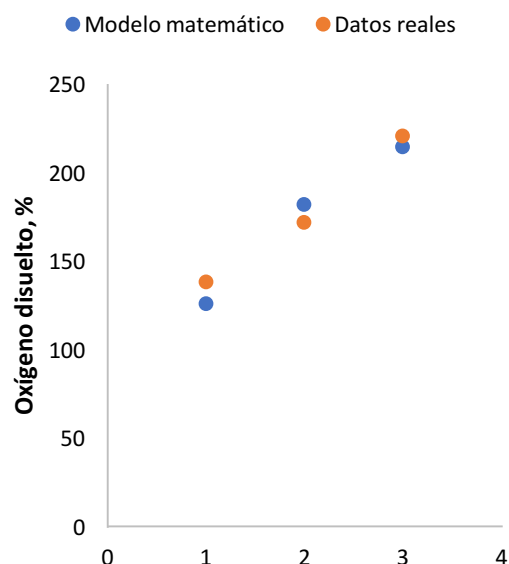


Figura 7. Validación del ajuste empírico

Se ha utilizado el modelo desarrollado por Fernández [3] para demostrar la relevancia del kla en la productividad del sistema. Éste es un modelo dinámico desarrollado para el cultivo de microalgas basado en principios fisicoquímicos y biológicos, que permite modelar la tasa fotosintética del alga (mg L⁻¹ h⁻¹).

A la vista de la Figura 8, se demuestra una mejora en la productividad del sistema, gracias a la mejora del coeficiente de transferencia de materia (kla) obtenido.

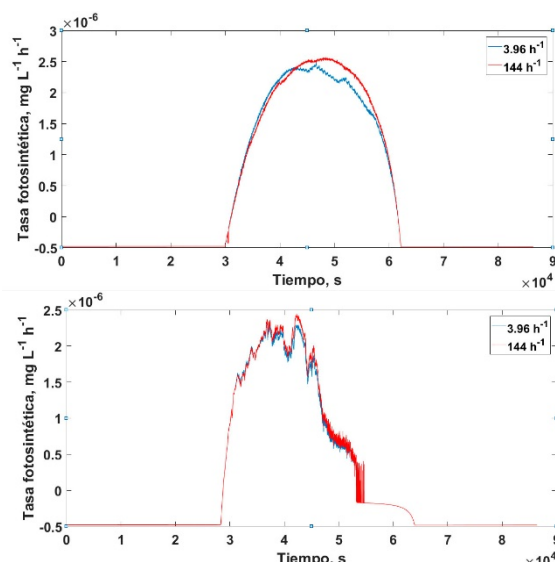


Figura 8. Mejora de la producción de oxígeno ($\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ h}^{-1}$) respecto al aumento del k_{La} (h^{-1}). Datos mostrados para dos días.

Numerosos estudios han mostrado una amplia gama de valores de k_{La} entre $0,4$ y 350 h^{-1} para diversos sistemas aireados [1]. Se obtuvieron valores de $63,7 \text{ h}^{-1}$ en el foso, en un reactor que operaba con una altura de líquido de $0,2 \text{ m}$, velocidad de dilución de $0,25 \text{ d}^{-1}$, velocidad de $0,22 \text{ m s}^{-1}$, $0,7 \text{ g}$ de sólidos totales L^{-1} , así como el caudal de gas de combustión de 100 L min^{-1} de una caldera de diesel [4]. En cambio, los resultados de este estudio muestran valores de hasta 144 h^{-1} a un caudal de aire de 350 L min^{-1} , altura de líquido de $0,15 \text{ m}$, $0,3 \text{ g}$ de Sólidos Totales L^{-1} y una velocidad de líquido de $0,26 \text{ m s}^{-1}$. Estas diferencias se explican por el incremento del caudal de aireación así como por la propia configuración del sistema de burbujeo empleado.

4 CONCLUSIONES

La transferencia de materia ocurre principalmente en el foso, siendo mucho menor en las palas y nula en el lazo de reactores raceway. La metodología utilizada permite medir el coeficiente de transferencia de materia en reactores ya en operación así como la influencia en el mismo de las condiciones de operación impuestas. Se ha determinado la influencia del caudal de gas sobre el coeficiente de transferencia de materia, obteniéndose un modelo empírico que ha sido calibrado. Mediante el uso de este modelo es posible regular adecuadamente el caudal de aire aportado en el foso de forma que se optimice el funcionamiento del reactor. Posteriormente deberán realizarse estudios para analizar la influencia de otras variables como la concentración de biomasa, composición del medio o velocidad del líquido en dicho coeficiente de transferencia de materia.

Agradecimientos

Este estudio fue apoyado por el apoyo financiero proporcionado por el Ministerio de Economía y Competitividad (DPI2014-55932-C2-1-R). Agradecemos la asistencia práctica del personal de la Estación Experimental Las Palmerillas de la Fundación Cajamar.

Referencias

- [1] Carvalho, A. P., Meireles, L. A., & Malcata, F. X. (2006). Microalgal reactors: A review of enclosed system designs and performances. *Biotechnology Progress*, 22(6), 1490–1506. <http://doi.org/10.1021/bp060065r>
- [2] Fernández, I., Acien, F. G., Guzmán, J. L., Berenguel, M., & Mendoza, J. L. (2016). Dynamic model of an industrial raceway reactor for microalgae production. *Algal Research*, 17, 67–78. <http://doi.org/10.1016/j.algal.2016.04.021>
- [3] Fernández, I., Acien, F. G., Berenguel, M., & Guzmán, J. L. (2014). First principles model of a tubular photobioreactor for microalgal production. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 53(27), 11121–11136. <http://doi.org/10.1021/ie501438r>
- [4] Mendoza, J. L., Granados, M. R., de Godos, I., Acien, F. G., Molina, E., Heaven, S., & Banks, C. J. (2013). Oxygen transfer and evolution in microalgal culture in open raceways. *Bioresource Technology*, 137, 188–195. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.127>
- [5] Merchuk, J. C., Sheva, B., & College, J. (2011). Photobioreactors – Models of Photosynthesis and Related Effects. *Comprehensive Biotechnology* (Second Edi, Vol. 1). Elsevier B.V. <http://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00103-3>
- [6] Molina Grima, E., Acien Fernández, F. G., García Camacho, F., & Chisti, Y. (1999). Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup. *Progress in Industrial Microbiology*, 35(C), 231–247. [http://doi.org/10.1016/S0079-6352\(99\)80118-0](http://doi.org/10.1016/S0079-6352(99)80118-0)

MODELADO DINÁMICO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE FRÍO VINCULADO A UN CICLO DE REFRIGERACIÓN

Guillermo Bejarano, José Joaquín Suffo, Manuel Vargas, Manuel G. Ortega
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla
gbejarano@us.es, sufagui@gmail.com, {mvargas, mortega}@us.es

Resumen

En este trabajo se estudia el modelado dinámico de un sistema de almacenamiento de frío basado en material de cambio de fase, que permita la gestión del frío generado por una planta experimental de refrigeración por compresión de vapor, basada en criterios económicos y de satisfacción de la demanda. Se describe el diseño del sistema de almacenamiento y se propone un modelo dinámico simplificado que permita estudiar la carga y descarga del mismo. Se incluyen algunas simulaciones de carga y descarga, realizadas considerando condiciones de contorno entálpicas y másicas del refrigerante y fluido secundario acordes a las generadas por la planta experimental.

Palabras clave: Sistemas de refrigeración, Almacenamiento de energía térmica, Materiales de cambio de fase, Modelado dinámico.

1. INTRODUCCIÓN

La demanda de energía requerida por los sistemas de refrigeración se ha convertido en un pilar esencial en la estructura energética. Esta demanda está creciendo significativamente en los últimos años, tanto en aplicaciones industriales y comerciales, como para sistemas de refrigeración doméstica [16]. Algunos informes elevan al 30 % el total de la energía consumida en todo el mundo asociada a sistemas de acondicionamiento de aire o HVAC (del inglés Heating, Ventilating and Air Conditioning) [4, 9], mientras que el informe más reciente sobre consumo de energía doméstica en EEUU señala que el 28 % de la energía consumida en hogares norteamericanos se debe a refrigeradores y sistemas HVAC [24].

La generación de frío mediante sistemas de compresión de vapor, véase la Figura 1, es sin duda el método más utilizado a nivel mundial. Se utiliza un fluido refrigerante para extraer calor del flujo secundario de un evaporador a baja presión, de manera que dicho calor es cedido al ambiente mediante un condensador que trabaja a presión más alta. El compresor se encarga de elevar la presión

del refrigerante, constituyendo el principal aporte energético externo para el funcionamiento del ciclo.

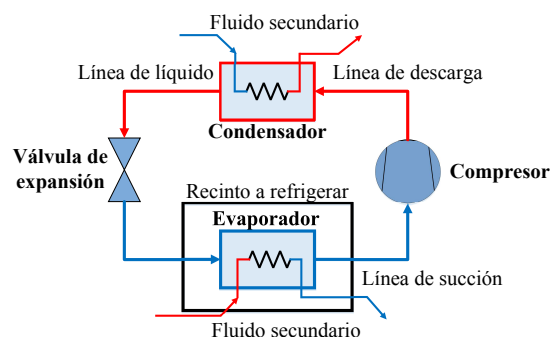


Figura 1: Sistema de refrigeración por compresión de vapor

Este método ha venido siendo utilizado desde hace décadas, si bien en sus orígenes el rendimiento energético dejaba mucho que desear. La aparición en los últimos años de nuevos diseños de sus elementos, así como el hecho de que el control automático ha permitido la incorporación de algoritmos que adaptan de forma continua los parámetros del sistema a las condiciones de trabajo, tanto en estado estacionario como en transitorio, ha permitido mejorar sensiblemente el Coeficiente de Comportamiento (*COP*, del inglés Coefficient of Performance). A pesar de ello, y debido a la creciente escasez de fuentes energéticas, el interés en seguir mejorando la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental de los sistemas actuales se ha visto incrementado en los últimos años.

Recientemente están apareciendo trabajos enfocados no solo a la generación de frío, sino también a la gestión del mismo. Una línea muy destacada es la incorporación de sistemas de almacenamiento de energía (TES, del inglés Thermal Energy Storage) para frío, de manera que se utilicen como reservorios donde almacenar excesos de *energía frigorífica* y extraerla cuando sea necesario. Entre las ventajas ofrecidas por estos sistemas de almacenamiento, destacan la oportunidad de flexibilizar las condiciones de operación, el diseño de equipos más

Tabla 1: Nomenclatura

Símbolos latinos		Subíndices y superíndices	
COP	Coefficiente de Comportamiento	$cond$	conducción
c_p	Calor específico a presión constante [$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$]	$conv$	convección
e	Espesor [m]	env	entorno
h	Entalpía específica [$J\ kg^{-1}$]	ext	exterior
\dot{m}	Caudal másico [$kg\ s^{-1}$]	in	entrada
n	Número de elementos	$ints$	interno
PCM	Material de cambio de fase	$intm$	fluido intermedio
\dot{Q}	Potencia térmica [W]	lat	estado latente
R	Resistencia térmica [$K\ W^{-1}$]	$lat-$	entalpía mínima en zona latente
r	Radio interior [m]	$lat+$	entalpía máxima en zona latente
T	Temperatura [K]	out	salida
TES	Sistema de almacenamiento de energía	pcm	PCM
t	Tiempo [s]	pcm_l	PCM en fase líquida
V	Volumen [m^3]	pcm_s	PCM en fase sólida
Símbolos griegos		ref	refrigerante
α	Coefficiente de transferencia de calor por convección [$W\ m^{-2}\ K^{-1}$]	ref_v	refrigerante en fase vapor
ε	Eficiencia del intercambio de calor	ref_2	refrigerante en zona bifásica
ζ	Fracción de la longitud total del intercambiador	sec	fluido secundario
κ	Conductividad térmica [$W\ m^{-1}\ K^{-1}$]	$wall$	pared
ρ	Densidad [$kg\ m^{-3}$]		

pequeños, un uso más eficiente de los mismos, así como la reducción del consumo de energía [7]. De hecho, el hecho de disponer de un sistema auxiliar capaz de almacenar el exceso de frío evita que el equipo sea sobredimensionado para hacer frente a los períodos de alta demanda [10].

En el contexto de un sistema de refrigeración, la posibilidad de aprovechar el precio bajo de la energía eléctrica durante los períodos de menor demanda se valora positivamente. Sin embargo, la demanda de frío debe ser satisfecha en tiempo real, por tanto la idea de disponer de un almacén de frío que pueda ser usado en períodos de alta demanda puede evitar la necesidad de generar frío en dichos períodos, con el consiguiente ahorro económico (*peak-shifting*) [6, 18].

En el diseño de estos reservorios de frío, los sistemas basados en materiales de cambio de fase (PCM, del inglés Phase-Change Material) se han impuesto como la opción más atractiva por encima de los materiales de calor sensible, debido a sus buenas propiedades termodinámicas para el intercambio de calor, no solo por una adecuada capacidad calorífica, sino también porque la temperatura de dichos materiales no varía apreciablemente siempre que se encuentren en zona latente [11]. Esto permite almacenar la misma cantidad de energía en un volumen inferior y permite un intercambio de calor más eficiente, ya que la diferencia de temperatura entre la fuente de frío y el fluido receptor permanece uniforme a lo largo del intercambiador de calor. Por ejemplo, Oró *et*

al. ofrece una clasificación de materiales actuales de cambio de fase sólido-líquido para aplicaciones de almacenamiento de frío, indicando temperatura de fusión y capacidad calorífica en la zona latente, además de otras propiedades físicas [14].

Pero si bien es importante el diseño del sistema, tanto desde el punto de vista de la elección del material como de su capacidad de almacenamiento, no lo es menos la gestión del mismo, a fin de optimizar índices de comportamiento. Una introducción sobre esta tecnología puede encontrarse en los trabajos publicados por Wang *et al.* [25, 26, 27]. En el primero de ellos se aborda el diseño de una planta de gran escala para un sistema de aire acondicionado apoyado por un anillo de TES basados en PCM [25]. En el segundo se muestra el modelado del sistema [26], mientras que en el tercero se propone una estrategia de control básica para la gestión del mismo, consistente en la activación de módulos situados en distintos emplazamientos de la instalación [27]. Asimismo, otros trabajos presentan un análisis exergético para medir el comportamiento de un sistema de aire acondicionado cuando se incorporan múltiples TES basados en PCM, tomando como estrategia de control el uso combinado de los distintos módulos [12, 13].

Trabajos más recientes utilizan control predictivo para la gestión de sistema de refrigeración. Por ejemplo, Shafiei *et al.* presenta un esquema de control MPC para minimizar las desviaciones de consumo de energía eléctrica respecto a un consumo de referencia en una planta de refrigeración de

gran escala [21]. Para ello utiliza la energía cargada y descargada del PCM, introduciendo en el problema de optimización una referencia de la temperatura de evaporación como una variable manipulable ficticia. Posteriormente, Shafiei *et al.* presenta un controlador predictivo para la gestión del sistema de refrigeración de un camión con cámara frigorífica, al cual se le incorpora en paralelo un tanque con PCM [20]. Se utilizan el perfil de la ruta e información del tráfico, así como de las condiciones ambientales, para predecir la demanda de carga térmica durante períodos de tráfico denso. Por su parte, Schalbart *et al.* presenta la aplicación del control MPC a la gestión de un almacén frigorífico de helados conectado a un TES basado en PCM [19]. El controlador está basado en las curvas estáticas del ciclo de refrigeración y en el balance energético entre el ciclo y el tanque, tratando de garantizar la calidad del helado mientras intenta reducir el consumo de energía. En esta configuración el depósito PCM está en serie, de manera que un sistema de refrigeración de potencia variable carga al TES, y este a su vez es descargado para enfriar el almacén frigorífico.

En el presente trabajo se aborda el modelado dinámico de un tanque TES dedicado al almacenamiento de frío generado en una planta experimental de refrigeración por compresión de vapor, lo que determina las condiciones de contorno de los fluidos de carga y descarga. El diseño estructural del sistema de almacenamiento es propio, así como el enfoque de modelado, que es totalmente parametrizable y permite tanto la simulación dinámica de procesos de carga y descarga completos, como el diseño de los parámetros de la instalación (propiedades del PCM, número y diámetro de esferas de PCM, longitud y diámetro de tubos, etc). Así, en la Sección 2 se describe el tanque TES a modelar y su conexión con la planta experimental; en la Sección 3 se describen las suposiciones realizadas y se detalla el modelo dinámico del sistema, mientras que en la Sección 4 se analizan algunos resultados de simulación obtenidos para procesos de carga y descarga. Finalmente, en la Sección 5 se resumen las principales conclusiones y se proponen algunos trabajos futuros.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

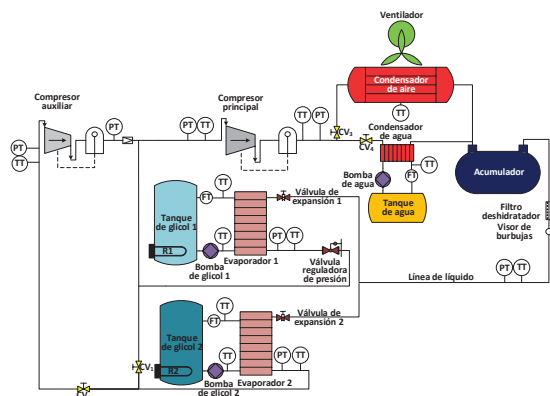
La Figura 2(a) muestra un diagrama de la planta experimental a la que se pretenden incorporar bloques TES basados en PCM. Aunque se han incluido dos compresores y dos evaporadores con sus respectivas válvulas de expansión, la planta se puede configurar para operar con una o dos etapas de compresión y con uno o dos recintos.

Se dispone de variadores de frecuencia para los dos compresores y todas las bombas de líquido, para un control más preciso de su velocidad. Ambos evaporadores son intercambiadores de placas, conectados a dos bucles de fluido secundario (solución acuosa de glicol) controlados en flujo (por las bombas de líquido) y temperatura (mediante las resistencias eléctricas). El Evaporador 1 debe trabajar en torno a 5°C y el Evaporador 2 aproximadamente a -20°C, ya que son niveles de referencia para refrigeración. Existen dos posibilidades para el condensador: bien un intercambiador de flujo cruzado refrigerado por aire o bien un intercambiador de placas que utiliza agua como fluido secundario. Las válvulas de expansión electrónica se controlan mediante modulación por ancho de pulso (PWM), mientras que el refrigerante usado es R404a. La planta tiene instrumentación completa: se han instalado termopares y transductores de presión en todos los puntos relevantes del ciclo, para poder calcular las entalpías específicas, y se mide el caudal volumétrico de los fluidos secundarios mediante caudalímetros magnéticos de inducción. Se puede consultar más información sobre los componentes de la planta en [2].

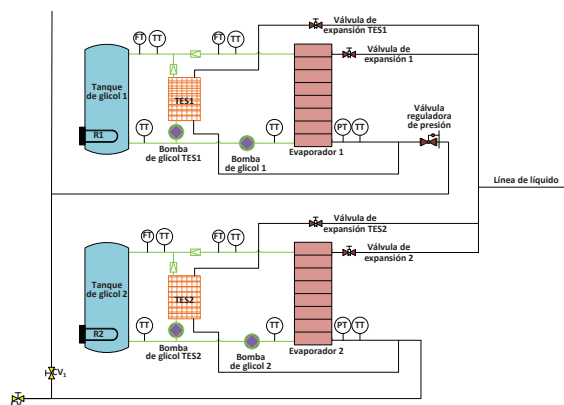
Se pretende añadir a esta planta dos bloques TES basados en PCM en paralelo con los dos recintos a refrigerar, uno para el recinto a 5°C (TES1) y otro para el recinto a -20°C (TES2), lo cual implicaría modificar la planta con dos líneas adicionales de refrigerante, con sus correspondientes válvulas de expansión, de manera que se habilite la posibilidad de cargar los TES. La descarga de los mismos se realizará mediante dos bombas que permitan recircular el fluido de los recintos a refrigerar por los TES correspondientes, tal como se muestra en la Figura 2(b).

En cuanto al diseño de los bloques TES, el PCM debe ser encapsulado de forma que las dos fases (sólido y líquido) permanezcan en contacto. Existen tres tipos de encapsulado [14, 17]: a granel, en el cual el PCM se almacena directamente dentro del tanque; el macroencapsulado, en el cual el PCM está formado por estructuras de diámetro superior a 1 cm recubiertas por una película polimérica, y por último el microencapsulado, donde las estructuras encapsuladas son aún más pequeñas e igualmente están recubiertas por un polímero.

En esta aplicación se ha seleccionado el macroencapsulado, de forma que el tanque de almacenamiento contiene esferas de PCM bañadas en un líquido de alta conductividad térmica y baja capacidad calorífica que constituye el lecho. En contacto con el mismo se instalan dos haces de tubos que atraviesan el tanque. El primero está destina-



(a) Diagrama esquemático de la planta experimental



(b) Detalle de la incorporación de bloques TES a la planta experimental de refrigeración

Figura 2: Planta experimental de refrigeración

do a la circulación del refrigerante, por tanto el tanque actúa como un evaporador donde el refrigerante se evapora mientras extrae calor del lecho y por tanto de las esferas de PCM. Por su parte, la solución acuosa de glicol circula por el segundo haz de tubos, cediendo calor al lecho y por tanto a las esferas de PCM. Esta estructura es similar a la propuesta por Tay *et al.* [23], mientras que el lecho está basado en la tecnología STL desarrollada por CRISTOPIA Energy Systems [5]. El esquema propuesto para el tanque TES se muestra en la Figura 3.

3. MODELADO DINÁMICO

Para el modelado dinámico del tanque TES se realizan algunas simplificaciones:

- (a) Se considera que el fluido intermedio que baña los tubos y las esferas de PCM tiene la misma temperatura en cualquier punto del tanque, debido a su alta conductividad térmica [1]. Esto simplifica el modelado ya que se trata de un modelo de parámetros concentrados

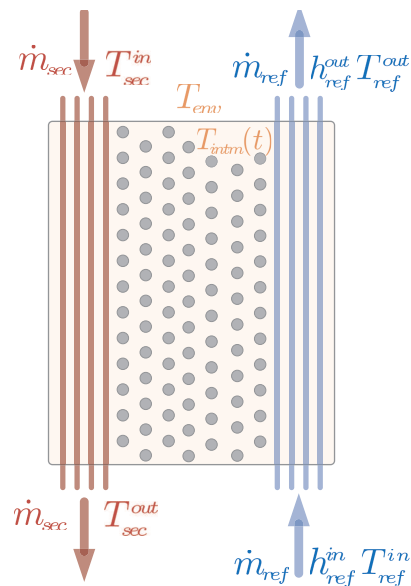


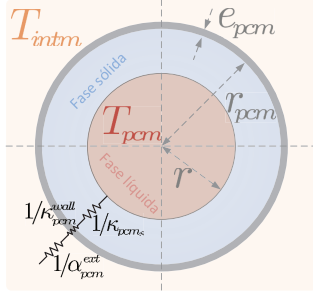
Figura 3: Esquema del tanque TES

y por tanto no se considera variación espacial del lado del fluido intermedio. Por tanto, este actúa simplemente como un integrador, interactuando con las potencias térmicas intercambiadas con las esferas de PCM, los tubos y el ambiente.

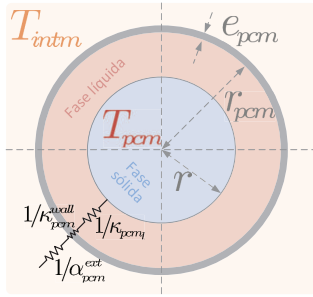
- (b) El superenfriamiento es un fenómeno bien conocido en el ámbito de PCM [22]. Este fenómeno consiste en que es necesario bajar la temperatura por debajo del punto de congelación para que dé comienzo la solidificación. Esta anomalía ocurre principalmente en fases iniciales de la solidificación, de forma que como este estudio se centra en la zona latente sin abordar específicamente el comienzo de la solidificación, el subenfriamiento es despreciado.
- (c) Otra propiedad de las mezclas homogéneas es que el cambio de fase ocurre en un pequeño rango de temperaturas en vez de a una única temperatura, como es el caso de sustancias puras [22]. Este es el caso del PCM, que es agravado por el hecho de que este rango de temperaturas depende de si se trata de un proceso de congelación o de fusión, con lo que se genera un ciclo de histéresis entre carga y descarga. Este efecto es despreciado en este estudio.

3.1. ESFERAS DE PCM

Durante el proceso de carga de frío, se asume que un único frente de congelación avanza hacia el interior de la esfera PCM. La Figura 4(a) muestra el modelo de una esfera PCM durante la carga.



(a) Diagrama esquemático de la esfera de PCM durante la carga de frío



(b) Diagrama esquemático de la esfera de PCM durante la descarga de frío

Figura 4: Modelo de la esfera de PCM en carga y descarga

Se define $r(t)$ como el radio instantáneo del límite esférico entre la fase sólida y líquida dentro de la cápsula. El núcleo fundido decrece mientras la corteza esférica exterior congelada va creciendo hacia el interior de la cápsula. Se considera que el sistema se encuentra completamente descargado antes de la fase de carga, por tanto $r(t=0) = r_{pcm}$ y $h_{pcm}(t=0) = h_{pcm}^{lat+}$, y que la fase de carga finaliza cuando $r(t)$ se anula.

Por otro lado, durante el proceso de descarga de frío, se asume que un único frente de fusión avanza hacia el interior de la esfera PCM. La Figura 4(b) muestra el modelo de la esfera PCM durante la descarga. En este caso el núcleo sólido decrece mientras la corteza esférica exterior fundida va creciendo hacia el interior de la cápsula. Se considera que el sistema se encuentra completamente cargado antes de la fase de descarga, por tanto $r(t=0) = r_{pcm}$ y $h_{pcm}(t=0) = h_{pcm}^{lat-}$, y que la fase de descarga finaliza de nuevo cuando $r(t)$ se anula.

Nótese que en la Figura 4 se utiliza la analogía eléctrica para modelar la transferencia de calor entre el núcleo en zona latente de la esfera PCM y el fluido intermedio que la baña. La evolución de $r(t)$ viene definida por (1), donde $\dot{Q}_{pcm}(t)$ es la potencia térmica transferida entre el fluido intermedio

y la esfera PCM, que se calcula mediante analogía eléctrica utilizando (2). Es importante señalar que $\dot{r}(t) < 0$ en carga y descarga.

$$\dot{Q}_{pcm}(t) = \mp \rho_{pcm} h_{pcm}^{lat} 4\pi r(t)^2 \dot{r}(t) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{pcm}(t) &= \frac{T_{intm}(t) - T_{pcm}}{R_{pcm}(t)} = \\ &= \frac{T_{pcm} - T_{intm}(t)}{R_{pcm}^{cond,int}(t) + R_{pcm}^{cond,wall} + R_{pcm}^{conv,ext}(t)} \end{aligned} \quad (2)$$

T_{pcm} es la temperatura del núcleo de la esfera de PCM, de forma que la corteza esférica exterior actúa simplemente como una capa conductora entre el núcleo y el fluido intermedio a temperatura $T_{intm}(t)$. $R_{pcm}(t)$ es la resistencia térmica global, compuesta por tres términos: conducción a través de la corteza esférica exterior de PCM congelado/fundido ($R_{pcm}^{cond,int}(t)$), conducción a través del recubrimiento polimérico de la esfera de PCM ($R_{pcm}^{cond,wall}$) y convección natural en el exterior de la esfera ($R_{pcm}^{conv,ext}(t)$).

3.2. FLUIDO INTERMEDIO

El fluido intermedio se encuentra contenido en el tanque a presión atmosférica, bañando las cápsulas de PCM y los haces de tubos de refrigerante y fluido secundario. Como se ha comentado anteriormente, debido a su alta conductividad térmica, se supone que su temperatura $T_{intm}(t)$ es homogénea en todo el tanque. El balance de potencias térmicas que afectan a este fluido viene determinado por (3).

$$\begin{aligned} -\rho_{intm} V_{intm} c_{p,intm} \frac{dT_{intm}(t)}{dt} = \\ = n_{ref} \dot{Q}_{ref}(t) + n_{sec} \dot{Q}_{sec}(t) + n_{pcm} \dot{Q}_{pcm}(t) - \dot{Q}_{env}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

$\dot{Q}_{ref}(t)$ es la potencia térmica transferida con cada tubo de refrigerante, mientras que $\dot{Q}_{sec}(t)$ es la potencia térmica transferida con cada tubo de fluido secundario. Por su parte, $\dot{Q}_{env}(t) > 0$ representa las pérdidas térmicas con el entorno. Durante el proceso de carga, no circula fluido secundario a través del tanque y por tanto $\dot{Q}_{sec}(t) = 0$, de forma que el refrigerante proporciona frío al fluido intermedio ($\dot{Q}_{ref}(t) > 0$) mientras que las cápsulas de PCM almacenan dicha energía tomándola del fluido intermedio ($\dot{Q}_{pcm} < 0$). Durante el proceso de descarga no circula refrigerante y por tanto $\dot{Q}_{ref}(t) = 0$, de forma que las cápsulas de PCM transfieren frío al fluido intermedio ($\dot{Q}_{pcm}(t) > 0$), y el fluido secundario lo toma del fluido intermedio ($\dot{Q}_{sec}(t) < 0$).

3.3. REFRIGERANTE Y FLUIDO SECUNDARIO

Durante la carga, el refrigerante circula a través de sus tubos bañados por el fluido intermedio. Se ha hecho uso del enfoque denominado *moving boundary* para modelar el comportamiento del refrigerante [15], que entra en el tanque en zona bifásica y puede salir del mismo como vapor sobrecalentado (*modo 1*), o bien como una mezcla bifásica con mayor título de vapor que a la entrada (*modo 2*).

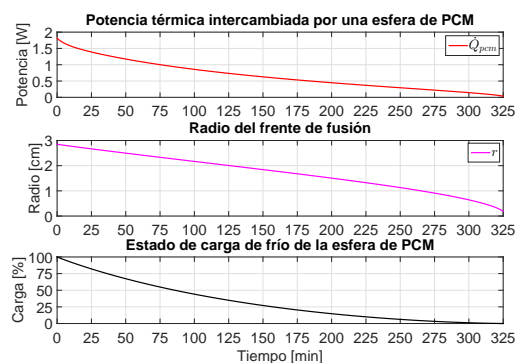
La Figura 5 muestra un diagrama de la transferencia de calor dentro del tanque, incluyendo también la transferencia con el fluido secundario. En cuanto al refrigerante, se ha representado el *modo 1*, en el cual se ha dividido el tubo en dos zonas de longitud variable, donde el refrigerante es bifásico y vapor sobrecalentado, respectivamente.

Se utiliza el método ε -NTU [3, 8] para el cálculo de las potencias térmicas \dot{Q}_{ref} y \dot{Q}_{sec} , así como la analogía eléctrica representada en la Figura 5. Nótese que las resistencias térmicas globales en los tubos incluyen la convección forzada del fluido circulante en el interior del tubo, la conducción a través de la pared y la convección libre del fluido intermedio en torno al tubo.

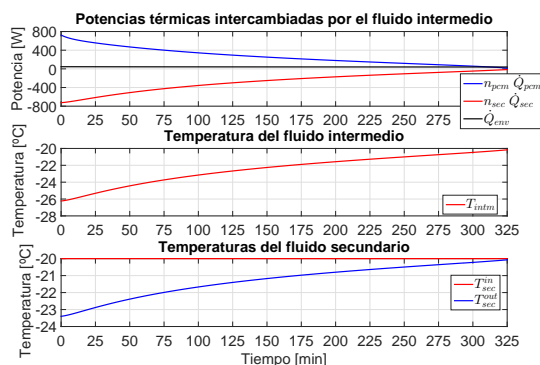
4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

A continuación se analizan simulaciones de carga y descarga completas en zona latente del tanque TES. Se ha seleccionado el que debe trabajar con el fluido secundario a -20°C , de forma que su temperatura de fusión es -30°C . La Figura 6 muestra la evolución dinámica de algunas variables durante un proceso de descarga completa en zona latente, en el que se parte de la esfera de PCM completamente sólida (sistema cargado) y se inyecta un

caudal constante de fluido secundario a través de los tubos, en condiciones similares a las utilizadas en el evaporador de la planta experimental de refrigeración. Se observa cómo a medida que r tiende a 0 la potencia intercambiada \dot{Q}_{pcm} disminuye en valor absoluto, debido a que la resistencia térmica de conducción debida a la capa fundida es mayor. Como consecuencia, el fluido intermedio aumenta su temperatura, y la temperatura de salida del fluido secundario cada vez es más cercana a la de entrada, al transferirse menos frío desde el fluido intermedio.



(a) Variables de una esfera de PCM



(b) Balance de potencias y temperaturas del fluido intermedio y fluido secundario

Figura 6: Descarga completa en zona latente

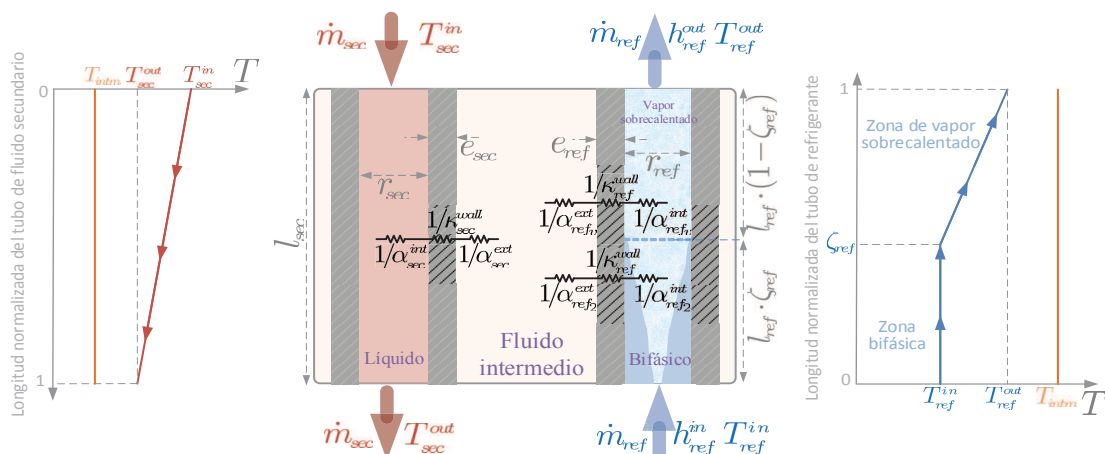
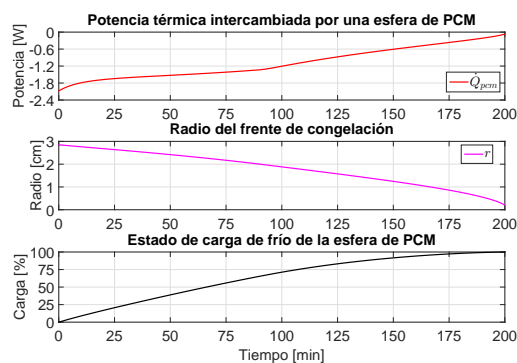
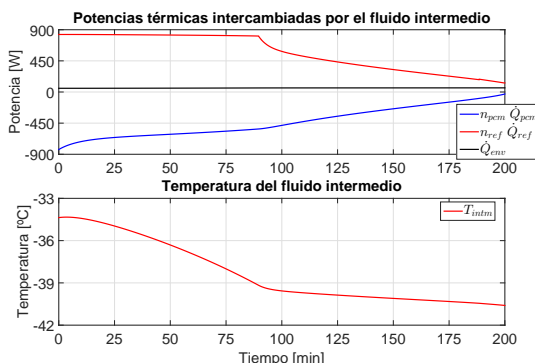


Figura 5: Diagrama de transferencia de calor a lo largo de los tubos de refrigerante y fluido secundario

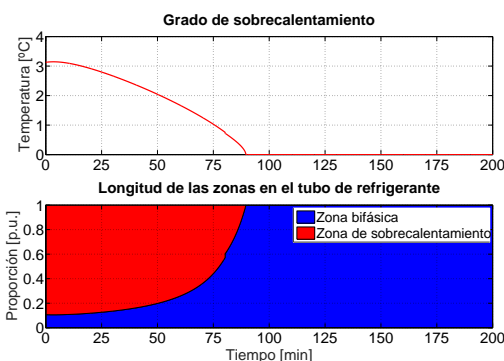
La Figura 7 muestra la evolución de algunas variables durante una carga completa en zona latente, en el que se parte de la esfera de PCM completamente fundida (sistema descargado) y se inyecta un caudal constante de refrigerante a través de los tubos, en condiciones entálpicas y de presión propias de la salida de la válvula de expansión correspondiente al evaporador a -20°C de la planta experimental de refrigeración. Nótese cómo \dot{Q}_{pcm} también disminuye en valor absoluto conforme la capa congelada crece. Por tanto, la potencia transferida desde las esferas de PCM al fluido intermedio también disminuye y el refrigerante disminuye su sobrecalentamiento a la salida del tanque TES, de forma que aproximadamente a la mitad de la carga empieza a salir del mismo en estado bifásico.



(a) Variables de una esfera de PCM



(b) Balance de potencias y temperatura del fluido intermedio



(c) Sobrecalentamiento y distribución de zonas del refrigerante

Figura 7: Carga completa en zona latente

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se ha propuesto un modelo dinámico simplificado para un tanque TES basado en PCM, de acuerdo al diseño del mismo para ser acoplado a una planta experimental de refrigeración. Este tanque TES permitirá la gestión del frío generado por la planta según criterios económicos. De acuerdo con las simplificaciones propuestas, se ha desacoplado el modelo en ecuaciones diferenciales para las esferas de PCM y el fluido intermedio que constituye el lecho, de forma que las variables de estado son el radio del frente de fusión/congelación en la esfera y la temperatura del fluido intermedio. Se han presentado resultados de simulaciones de carga y descarga completas, donde se ha observado la influencia del crecimiento de la corteza esférica sólida/fundida en la potencia térmica transferida por la esfera de PCM y por tanto en su velocidad de carga y descarga, así como en las condiciones del refrigerante y el fluido secundario a la salida de los tubos.

Este modelo solo es válido para procesos de carga/descarga completos, ya que si por ejemplo a una carga parcial le sigue una descarga, se crea un nuevo frente de fusión/congelación debido a que el cambio de fase siempre comienza desde la periferia de la esfera. Esto multiplica el número de estados en operaciones parciales, por lo que se plantea como trabajo futuro desarrollar un modelo discretizado que permita estudiar la operación parcial del sistema sin aumentar el número de estados.

Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento al Ministerio de Ciencia e Innovación por la financiación de este trabajo, a través de los proyectos DPI2015-70973-R y DPI2016-79444-R.

Referencias

- [1] N. A. M. Amin, M. Belusko, and F. Bruno. An effectiveness-NTU model of a packed bed PCM thermal storage system. *Appl. Energy*, 134:356–362, 2014.
- [2] G. Bejarano, J. A. Alfaya, M. G. Ortega, and F. R. Rubio. Design, automation and control of a two-stage, two-load-demand experimental refrigeration plant. In *23rd Mediterranean Conf. on Control and Autom., Torremolinos (Spain)*, pages 537–544, 2015.
- [3] T. L. Bergman, F. P. Incropera, A. S. Lavine, and D. P. Dewitt. *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons, 7th edition, 2011.

- [4] L. O. S. Buzelin, S. C. Amico, J. V. C. Vargas, and J. A. R. Parise. Experimental development of an intelligent refrigeration system. *Int. J. Refrig.*, 28(2):165–175, 2005.
- [5] Cristopia Energy Systems. <http://cristopia.com/>.
- [6] I. Dincer. On thermal energy storage systems and applications in buildings. *Energy and Build.*, 34(4):377–388, 2002.
- [7] I. Dincer and M. Rosen. *Thermal energy storage: systems and applications*. John Wiley & Sons, 2002.
- [8] J. P. Holman. *Heat transfer*. MacGraw-Hill Inc, 8th edition, 2001.
- [9] K. A. Jahangeer, A. A. O. Tay, and M. R. Islam. Numerical investigation of transfer coefficients of an evaporatively-cooled condenser. *Appl. Therm. Eng.*, 31(10):1655–1663, 2011.
- [10] M. M. MacCracken. Thermal energy storage myths. *Energy Eng.*, 101(4):69–80, 2004.
- [11] H. Mehling and L. F. Cabeza. *Heat and cold storage with PCM*. Springer, 2008.
- [12] A. Mosaffa, L. G. Farshi, C. I. Ferreira, and M. Rosen. Advanced exergy analysis of an air conditioning system incorporating thermal energy storage. *Energy*, 77:945–952, 2014.
- [13] A. Mosaffa, C. I. Ferreira, F. Talati, and M. Rosen. Thermal performance of a multiple PCM thermal storage unit for free cooling. *Energy Convers. and Manag.*, 67:1–7, 2013.
- [14] E. Oró, A. De Gracia, A. Castell, M. Farid, and L. Cabeza. Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications. *Appl. Energy*, 99:513–533, 2012.
- [15] B. P. Rasmussen and A. G. Alleyne. Dynamic modeling and advanced control of air conditioning and refrigeration systems. Technical report, Air Cond. and Refrig. Cent., Coll. of Eng., University of Illinois at Urbana-Champaign., 2006.
- [16] B. P. Rasmussen, A. Musser, and A. G. Alleyne. Model-driven system identification of transcritical vapor compression systems. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 13:444–451, 2005.
- [17] A. F. Regin, S. Solanki, and J. Saini. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review. *Renew. and Sustain. Energy Rev.*, 12(9):2438–2458, 2008.
- [18] B. Rismanchi, R. Saidur, G. BoroumandJazi, and S. Ahmed. Energy, exergy and environmental analysis of cold thermal energy storage (CTES) systems. *Renew. and Sustain. Energy Rev.*, 16(8):5741–5746, 2012.
- [19] P. Schalbart, D. Leducq, and G. Alvarez. Ice-cream storage energy efficiency with model predictive control of a refrigeration system coupled to a PCM tank. *Int. J. of Refrig.*, 52:140–150, 2015.
- [20] S. E. Shafiei and A. Alleyne. Model predictive control of hybrid thermal energy systems in transport refrigeration. *Appl. Therm. Eng.*, 82:264–280, 2015.
- [21] S. E. Shafiei, J. Stoustrup, and H. Rasmussen. Model predictive control for flexible power consumption of large-scale refrigeration systems. In *Am. Control Conf. (ACC), 2014*, pages 412–417. IEEE, 2014.
- [22] W. Streicher, J. Bony, S. Citherlet, A. Heinz, P. Puschnig, H. Schranzhofer, and J. Schultz. Simulation models of PCM storage units. Technical report, Report of IEA Solar Heat. and Cool. Program., 2008.
- [23] N. Tay, M. Belusko, and F. Bruno. Experimental investigation of tubes in a phase change thermal energy storage system. *Appl. Energy*, 90(1):288–297, 2012.
- [24] US Energy Information Administration. Residential energy consumption survey (RECS). Technical report, Energy Inf. Adm., Washington D.C, USA, 2009.
- [25] F. Wang, G. Maidment, J. Missenden, and R. Tozer. The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 1: Experimental investigation. *Appl. Therm. Eng.*, 27(17):2893–2901, 2007.
- [26] F. Wang, G. Maidment, J. Missenden, and R. Tozer. The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 2: Dynamic simulation model for the combined system. *Appl. Therm. Eng.*, 27(17):2902–2910, 2007.
- [27] F. Wang, G. Maidment, J. Missenden, and R. Tozer. The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 3: PCM for control and energy savings. *Appl. Therm. Eng.*, 27(17):2911–2918, 2007.

Predictor Intervalar basado en hiperplano soporte

J.M. Bravo, M.J. Vasallo y E. Cojocarú

Departamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas Informáticos y Automática, Universidad de Huelva
email:{caro,manuel.vasallo}@uhu.es

T. Alamo

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Sevilla
email:talamo@us.es

Resumen

En este trabajo se aborda el problema de construir un modelo predictor. Dicho modelo debe ser capaz de predecir la salida futura de un sistema dinámico, haciendo uso de información pasada guardada en históricos. Este trabajo se centra en el estudio de modelos predictores que proporcionan una predicción de tipo intervalar. Una predicción intervalar está compuesta por un límite inferior y otro superior. La salida del sistema debe estar comprendida entre ambos límites del intervalo. Dado un conjunto de datos obtenidos del sistema dinámico, la predicción intervalar se calcula utilizando hiperplanos soporte a dichos datos. Cualquier punto dentro del intervalo se puede utilizar como predicción puntual. En concreto, en este trabajo se propone la utilización del punto central entre hiperplanos soporte. La principal bondad del predictor propuesto es su capacidad de proporcionar predicciones donde el tamaño del intervalo y el error de la predicción puntual están balanceados. Un parámetro de diseño incluido en el predictor permite compensar dichos objetivos. Además el trabajo propone una metodología basada en validación cruzada para realizar el ajuste de dicho parámetro. El trabajo incluye un ejemplo con datos reales con el fin de ilustrar el comportamiento del predictor.

Palabras clave: Predicción, error acotado, identificación de sistemas.

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los métodos de predicción se basan en un modelo matemático del sistema. Este modelo se puede obtener aplicando los principios físicos que definen el funcionamiento del sistema. Sin embargo, el modelado de un sistema requiere los conocimientos de un experto y el ajuste de los parámetros que se incluyan en el modelo. Otra opción es aplicar técnicas de identificación de sistemas [13]. Los métodos de identificación de sistemas infieren modelos dinámicos a partir de datos. Uno de los métodos más utilizados es el basado en error de predicción. Dada una familia de mo-

delos parametrizada y un conjunto de datos, estos métodos seleccionan el valor de los parámetros que minimizan cierto criterio, por ejemplo, el error cuadrático de predicción. Una vez identificado el modelo, aplicando nuevas medidas se pueden obtener predicciones del futuro comportamiento del sistema. Nótese que con este esquema de trabajo, una vez seleccionado el modelo de sistema, el conjunto de datos usado para la identificación ya no es necesario para realizar las predicciones.

Una alternativa a lo expuesto en el párrafo anterior son los métodos no paramétricos [9]. Cuando se necesita una predicción, los métodos paramétricos acceden al conjunto histórico de datos del sistema y lo utilizan para construir la predicción requerida. En este contexto se han propuesto predictores basados en los vecinos más cercanos, linealización local o funciones kernel [8].

Los sistemas de control automático utilizan sistemas predictores para optimizar su rendimiento. Ejemplos en este sentido los podemos encontrar en los sistemas de control predictivo [5] y en los sistemas de detección y diagnosis de fallos [11]. Una extensión interesante de los sistemas de predicción son los predictores intervalares. Dichos predictores proporcionan una predicción intervalar basada en una cota inferior y otra superior. La predicción intervalar acota externamente el futuro comportamiento del predictor teniendo en cuenta perturbaciones, ruido o dinámicas no modeladas. Además, un punto del intervalo se puede utilizar como predicción puntual. Los predictores intervalares son componentes importantes de sistemas de control robusto [3] o sistemas de detección de fallos en presencia de incertidumbres [10, 6].

Una forma de obtener predictores intervalares es utilizar métodos de identificación de sistemas basados en error acotado [14]. En este caso se considera que la salida del sistema está contaminada por un ruido desconocido pero acotado. Teniendo en cuenta una familia paramétrica de modelos, un conjunto de medidas y la acotación del ruido, estos métodos obtienen el conjunto de parámetros que es consistente con las medidas, la familia de modelos y el error acotado. Para acotar dicho conjunto de parámetros se han utilizado diferen-

tes figuras geométricas. Elipsoides, paralelotos y zonotos son las más conocidas [7, 16, 1]. Los métodos de acotación también se pueden formular desde el punto de vista no paramétrico. En [15] se asume que el modelo pertenece a un conjunto de funciones con constante de Lipschitz acotada. En [4] se propone una familia de predictores intervalares que utiliza datos almacenados y norma-1 para acotar la predicción.

En este trabajo se propone un predictor intervalar basado en el concepto de hiperplano soporte. Dado un conjunto de datos, el predictor calcula planos soporte superior e inferior a dicho conjunto y los utiliza para proporcionar la predicción intervalar. Dichos planos se obtienen resolviendo un problema de optimización con restricciones convexas. El predictor incluye un parámetro que permite balancear su rendimiento. En un límite del valor del parámetro, el método proporciona la predicción intervalar de menor anchura proporcionada por los hiperplanos soporte. En el límite opuesto, el predictor minimiza los errores cuadráticos de la predicción puntual. Valores intermedios generan predicciones compensadas entre dichos extremos. En el artículo se propone una metodología basada en validación cruzada para estimar el valor adecuado de dicho parámetro.

El método propuesto presenta una serie de ventajas respecto a otros métodos conocidos para obtener predictores intervalares. A diferencia de los métodos basados en error acotado, no es necesario conocer a priori una cota del error en las medidas. Tampoco es necesario asumir como conocida la distribución estadística del error asociado a las medidas, información sí necesaria para obtener intervalos de confianza en el contexto estocástico. Finalmente, el método propuesto está relacionado con la regresión cuantil [12]. En regresión basada en cuantiles, se resuelve un problema de optimización que pondera la penalización de errores de signo positivo o negativo. La principal ventaja del método propuesto respecto a la regresión cuantil, es la posibilidad antes comentada de poder balancear el rendimiento de la predicción puntual y la intervalar.

En la Sección 2 se formula el problema. El predictor propuesto se presenta en la Sección 3. Algunas consideraciones prácticas se pueden consultar en la Sección 4. La Sección 5 muestra un ejemplo que ilustra el método propuesto. Finalmente algunas conclusiones y trabajo futuro se pueden ver en las Secciones 6 y 7.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Considérese un sistema dinámico en tiempo discreto. En el instante de tiempo k , $y_k \in \mathbb{R}$ denota una salida medida del sistema y $x_k \in X \subseteq \mathbb{R}^{n_x}$, siendo X un conjunto compacto, un vector de medidas del sistema. Este vector puede incluir, por ejemplo, medidas pasadas de entradas y salidas del sistema. La formulación matemática que relaciona y_k y x_k es desconocida. Dado el vector x_k , el problema planteado en este trabajo es obtener un intervalo $IP_{\mathcal{D}}(x_k) = [\underline{y}_k, \bar{y}_k]$ tal que $\underline{y}_k \leq y_k \leq \bar{y}_k$.

El predictor intervalar propuesto se basa en tomar un conjunto \mathcal{D} de datos de entrada y salida del sistema e identificar un modelo de predicción. La Hipótesis 1 establece la necesidad de disponer de dicho conjunto.

Hipótesis 1 *Se dispone de un conjunto $\mathcal{D} = \{(x_i, y_i), \text{ con } i = 1, \dots, N\}$ de medidas del sistema obtenido con un nivel de excitación adecuado.*

La futura capacidad de predicción del modelo está relacionada con la similitud del comportamiento futuro y pasado del sistema al que se aplica. Todo sistema de inferencia se basa en ese principio. Por ejemplo, si estamos en el contexto estocástico, se asume que las propiedades de dos muestras aleatorias de una misma variable deben ser muy similares. En el presente trabajo, la Hipótesis 2 concreta el concepto de similitud que se asume a la hora de aplicar el predictor intervalar propuesto.

Hipótesis 2 *Sean \mathcal{D}_A y \mathcal{D}_B dos conjuntos de datos de entrada-salida obtenidas del sistema a partir de una excitación adecuada. La envolvente convexa del conjunto \mathcal{D}_A tiende a ser la misma que la envolvente convexa del conjunto \mathcal{D}_B cuando el número de muestras crece.*

3. PREDICTOR PROPUESTO

Tal y como se comentó en la Introducción, el predictor intervalar se basa en el concepto de hiperplano soporte [2].

Definición 1 (Hiperplano soporte) *Dado un conjunto \mathcal{C} y un punto $z_o \in \text{bd}\mathcal{C}$ en la frontera de \mathcal{C} . Si $\beta \neq 0$ satisface $\beta^T z \leq \beta^T z_o$ para todo $z \in \mathcal{C}$, entonces el hiperplano $\{z : \beta^T z = \beta^T z_o\}$ es un hiperplano soporte a \mathcal{C} en el punto z_o .*

Existen muchas formas de obtener un hiperplano soporte a un conjunto dado. En la siguiente definición se establece un tipo de hiperplano que tal y como se muestra en la Propiedad 1 es soporte al

conjunto \mathcal{D} . Este hiperplano soporte es una de las ideas en las que se apoya el predictor intervalar desarrollado.

Definición 2 Dado el conjunto \mathcal{D} se define el hiperplano $\mathcal{H}_{\mathcal{D}}$ como

$$\mathcal{H}_{\mathcal{D}} = \{[x^T \ y]^T : [x^T \ 1]\theta^* - y = 0\}$$

donde θ^* se obtiene resolviendo el problema de optimización

$$\begin{aligned} \min_{\theta} \quad & \sum_{i=1}^N (y_i - [x_i^T \ 1]\theta)^2 \\ \text{s.t.} \quad & [x_i^T \ 1]\theta \leq y_i \quad i = 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (1)$$

Propiedad 1 Una propiedad interesante del hiperplano $\mathcal{H}_{\mathcal{D}}$ es que es un hiperplano soporte a \mathcal{D} .

Prueba. Para realizar la demostración hay que probar que el hiperplano $\mathcal{H}_{\mathcal{D}}$ incluye al menos uno de los puntos del conjunto \mathcal{D} y que el resto de puntos están en uno de los semiespacios creados por el hiperplano. Se procede a la demostración por reducción al absurdo. Supongamos que θ^* cumple las restricciones del problema y no contiene a ningún punto. Esto es equivalente a decir que las restricciones del problema de optimización se cumplen de forma estricta: $[x_i^T \ 1]\theta^* < y_i$, $i = 1, \dots, N$. Esto se puede expresar diciendo que $[x_i^T \ 1]\theta^* = y_i - \epsilon_i$, donde $\epsilon_i > 0$, $i = 1, \dots, N$. Entonces, tomando $s = \arg \min_{i=1, \dots, N} \epsilon_i$, se puede definir

$$\hat{\theta} = \theta^* + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \epsilon_s.$$

Por definición:

$$\begin{aligned} [x_i^T \ 1]\hat{\theta} &= [x_i^T \ 1]\theta^* + \epsilon_s \\ &= y_i - \epsilon_i + \epsilon_s \leq y_i - \epsilon_i + \epsilon_i = y_i. \end{aligned}$$

De lo anterior se deduce que $\hat{\theta}$ es una solución factible al problema. Por otro lado, nótese que

$$\begin{aligned} (y_i - [x_i^T \ 1]\hat{\theta})^2 &= (y_i - [x_i^T \ 1]\theta^* - \epsilon_s)^2 \\ &= (\epsilon_i - \epsilon_s)^2 \\ &< \epsilon_i^2 \\ &= (y_i - [x_i^T \ 1]\theta^*)^2. \end{aligned}$$

Finalmente sumando la anterior desigualdad desde $i = 1$ hasta $i = N$ obtenemos que:

$$\sum_{i=1}^N (y_i - [x_i^T \ 1]\hat{\theta})^2 < \sum_{i=1}^N (y_i - [x_i^T \ 1]\theta^*)^2.$$

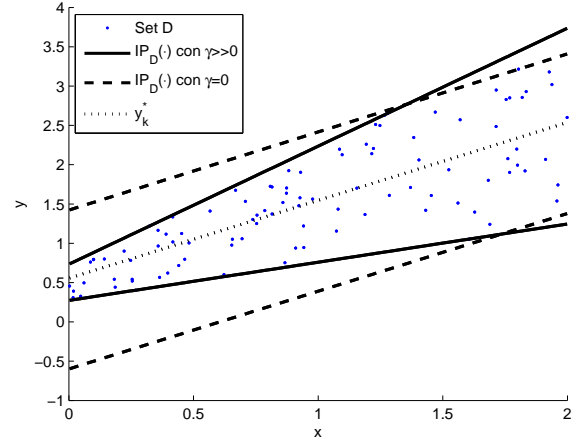


Figura 1: Ejemplo de aplicación de $IP_{\mathcal{D}}(\cdot)$.

Pero esto contradice la optimalidad de θ^* . Se ha demostrado pues que

$$[x_i^T \ 1]^T \theta^* \leq y_i, i = 1, \dots, N.$$

donde la desigualdad se hace igualdad al menos en un índice s . Es decir, existe s tal que $[x_s^T \ 1]\theta^* = y_s$. Si restamos esta igualdad a las desigualdades anteriores obtenemos

$$[(x_i - x_s)^T \ 0]^T \theta^* \leq y_i - y_s, i = 1, \dots, N.$$

Denotando ξ^* a las primeras n componentes de θ^* se obtiene

$$(x_i - x_s)^T \xi^* \leq y_i - y_s, i = 1, \dots, N.$$

Finalmente hacemos

$$\beta = \begin{bmatrix} \xi^* \\ -1 \end{bmatrix}.$$

Con esta definición

$$[x_i^T \ y_i]\beta \leq [x_s^T \ y_s]\beta, \quad i = 1, \dots, N.$$

■

Observación 1 Por definición se tiene que $[x_i^T \ 1]\theta^* \leq y_i$ para $i = 1, \dots, N$. Por tanto, el hiperplano $\mathcal{H}_{\mathcal{D}}$ acota inferiormente a la envolvente convexa del conjunto \mathcal{D} en la componente y . Además, por la Propiedad 1, esta cota es ajustada pues existe un índice s tal que $[x_s^T \ 1]\theta^* = y_s$.

El problema de optimización (2) se puede modificar para obtener un hiperplano que acote superiormente el conjunto \mathcal{D} en la componente y . Bastaría con cambiar el sentido de las desigualdades,

esto es, $[x_i^T \ 1]\theta \geq y_i$ con $i = 1, \dots, N$. Esta idea nos permite proponer un predictor intervalar para la salida del sistema. El predictor obtiene sendos hiperplanos que acotan superiormente e inferiormente la envolvente convexa del conjunto \mathcal{D} en la componente y .

Definición 3 Dado un vector x_k se define el predictor intervalar $IP_{\mathcal{D}}(x_k) = [\underline{y}_k, \bar{y}_k]$ donde

$$\underline{y}_k = [x_k^T \ 1]\underline{\theta}^* - \underline{\alpha}^*$$

$$\bar{y}_k = [x_k^T \ 1]\bar{\theta}^* + \bar{\alpha}^*$$

y siendo $\underline{\theta}^*, \bar{\theta}^*, \underline{\alpha}^*$ y $\bar{\alpha}^*$ las soluciones óptimas de los problemas de optimización

$$\begin{aligned} \min_{\underline{\theta}, \underline{\alpha}} \quad & \sum_{i=1}^N (y_i - [x_i^T \ 1]\bar{\theta})^2 + \gamma \underline{\alpha} \\ \text{s.t.} \quad & [x_i^T \ 1]\underline{\theta} \leq y_i + \underline{\alpha} \quad i = 1, \dots, N \\ & \underline{\alpha} \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \min_{\bar{\theta}, \bar{\alpha}} \quad & \sum_{i=1}^N (y_i - [x_i^T \ 1]\bar{\theta})^2 + \gamma \bar{\alpha} \\ \text{s.t.} \quad & [x_i^T \ 1]\bar{\theta} \geq y_i - \bar{\alpha} \quad i = 1, \dots, N \\ & \bar{\alpha} \geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

donde $\gamma > 0$ es un parámetro de diseño. Así mismo se propone como predicción puntual

$$y_k^* = \frac{1}{2} [x_k^T \ 1](\bar{\theta}^* + \underline{\theta}^*).$$

En la figura 1 se muestra un ejemplo numérico del predictor propuesto. El conjunto de puntos representa el conjunto \mathcal{D} . Las acotaciones intervalares obtenidas para $\gamma = 0$ y $\gamma \gg 0$ se muestra con líneas discontinuas y continuas respectivamente. La línea central punteada es la predicción puntual obtenida con $\gamma = 0$.

Observación 2 Nótese que las variables $\bar{\alpha}, \underline{\alpha}$ son redundantes en (2) y (3), ya que aplicando las igualdades $\bar{\alpha} = \max_{i=1, \dots, N} \{0, y_i - r_i^T \bar{\theta}\}$ y $\underline{\alpha} = \max_{i=1, \dots, N} \{0, r_i^T \underline{\theta} - y_i\}$ es posible reformular los problemas de optimización (2) y (3) como problemas de optimización convexos pero sin restricciones. En este caso, es sencillo ver que cuando $\gamma = 0$, los problemas de optimización (2) y (3) son equivalentes a un solo problema de optimización lineal cuadrático sin restricciones. Por otro lado, las formulaciones (2) y (3) son muy cercanas a la formulación estándar de los problemas de optimización QPs, lo que facilita su implementación en un computador.

El predictor propuesto tiene un conjunto de características que se comentan a continuación. Lo primero que hay que destacar es que se puede considerar que la Definición 3 proporciona una familia de predictores intervalares parametrizada en γ . Si $\gamma = 0$ entonces $\underline{\theta}^* = \bar{\theta}^* = \theta^{LS}$ donde $\theta^{LS} = (\Omega^T \Omega)^{-1} \Omega^T Y$ con $\Omega = [r_1 \ r_i \ \dots \ r_N]^T$, $r_i = [x_i \ 1]$, $i = 1, \dots, N$ y $Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_N]$. De lo anterior se deduce que cuando $\gamma = 0$, la predicción puntual y_k^* es óptima desde el punto de vista del error cuadrático de predicción, de hecho, es la predicción obtenida mediante mínimos cuadrados. Así mismo, teniendo en cuenta que $\underline{\alpha}^* = \max_{i=1, \dots, N} \{0, r_i^T \theta^{LS} - y_i\}$ y $\bar{\alpha}^* = \max_{i=1, \dots, N} \{0, y_i - r_i^T \theta^{LS}\}$, se tiene que $\bar{y}_k - \underline{y}_k \geq \underline{\alpha}^* + \bar{\alpha}^*$. Esta propiedad es importante porque se garantiza que para todo $x_k \in X$ siempre existe un valor de $\gamma \geq 0$ tal que $\underline{y}_k \leq y_k^* \leq \bar{y}_k$, asegurándose de esta forma la consistencia de los límites en la predicción.

Por otro lado, cuando $\gamma \rightarrow \infty$ se tiene que $\underline{\alpha}^*, \bar{\alpha}^* \rightarrow 0$. La consecuencia es que los problemas de optimización (2) y (3) pertenecen a la clase presentada en la Definición 2. Por tanto, las soluciones óptimas $\underline{\theta}^*$ y $\bar{\theta}^*$ proporcionan sendos hiperplanos soporte que acotan externa y ajustadamente el conjunto \mathcal{D} . En este caso la predicción intervalar tiende a ser más ajustada que cuando $\gamma \rightarrow 0$, pero se pierde la optimalidad de la predicción puntual.

Como resumen de lo expuesto anteriormente, el predictor intervalar propuesto incluye un parámetro γ a definir por el usuario que permite balancear el tamaño del intervalo obtenido y el error de la predicción puntual. En la siguiente sección se proporciona un método empírico que permite ajustar dicho parámetro a partir del conjunto de datos \mathcal{D} .

4. Consideraciones Prácticas

El predictor intervalar propuesto $IP_{\mathcal{D}}(\cdot)$ asume el contenido de la Hipótesis 2. Sin embargo, al igual que en cualquier sistema de inferencia, la comprobación de las hipótesis de trabajo no es sencilla. Sin embargo, hay otra forma de proceder. Dado un conjunto de datos, lo que sí se puede comprobar es si dichos datos son compatibles con las hipótesis asumidas. En este artículo se propone un esquema de trabajo basado en validación cruzada que permite rechazar la validez de lo asumido. El esquema de chequeo se basa en la \mathcal{D}^μ -consistencia del parámetro de diseño γ . Básicamente la idea es, fijado un valor de γ , comprobar qué número de salidas y_i del conjunto de datos \mathcal{D} se predicen de forma correcta, esto es $y_i \in IP_{\mathcal{D}_i}(x_i)$, utilizando el predictor propuesto y el conjunto de puntos $\mathcal{D}_i = \mathcal{D} \setminus \{(x_i, y_i)\}$. Nótese que la pareja (x_i, y_i)

se ha eliminado del conjunto \mathcal{D} para realizar la validación cruzada. La Definición 4 formaliza esta idea.

Definición 4 Dado el predictor intervalar $IP_{\mathcal{D}}(\cdot)$ y un valor $\mu \in [0, 1]$, el parámetro γ es \mathcal{D}^μ -consistente si

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbb{I}_{\{IP_{\mathcal{D}_i}(x_i)\}}(y_i) \geq \mu$$

donde

$$\mathbb{I}_{\{A\}}(y) = \begin{cases} 1 & \text{si } y \in A \\ 0 & \text{si } y \notin A \end{cases}$$

es la función indicador y $\mathcal{D}_i = \mathcal{D} \setminus \{(x_i, y_i)\}$.

La comprobación de la \mathcal{D}^μ -consistencia de cierto valor del parámetro γ se puede realizar mediante el Algoritmo 1.

Algoritmo 1: \mathcal{D}^μ -consistencia(\mathcal{D}, γ, μ)

```

cont = 0;
for i = 1:N
    Obtener  $\mathcal{D}_i = \mathcal{D} \setminus \{(x_i, y_i)\}$ 
    if  $y_i \in IP_{\mathcal{D}_i}(x_i)$ 
        cont = cont+1
    endif
endfor
if  $\frac{cont}{N} \geq \mu$ 
    return true
else
    return false
endif
End
```

Nótese que un valor γ que sea \mathcal{D}^1 -consistente implica que para todas las medidas y_i del conjunto \mathcal{D} se cumple que $y_i \in IP_{\mathcal{D}_i}(x_i)$. Sin embargo, exigir $\mu = 1$ puede ser demasiado estricto para ciertos problemas, provocando una degradación de los resultados. Por ejemplo, puede haber dinámicas puntuales no recogidas por el modelo, o bien, los datos pueden tener valores extraños, outliers, que invaliden las predicciones intervalares. Este problema u otros similares se pueden atenuar permitiendo valores de μ menores a 1.

Por último, el usuario debe seleccionar un valor concreto de γ . Una leve ampliación del Algoritmo 1 nos puede permitir realizar dicha elección. Fijado un valor μ , se puede tomar como γ el valor \mathcal{D}^μ -consistente que proporcione el mejor rendimiento en algún sentido. Por ejemplo se puede tomar el valor de γ que sea \mathcal{D}^μ -consistente y minimice el tamaño medio de la anchura de la predicción intervalar. En este artículo se propone la utilización de un valor de γ que balancee el tamaño del intervalo y el error de la predicción puntual. En la siguiente sección se presenta un ejemplo de dicha elección.

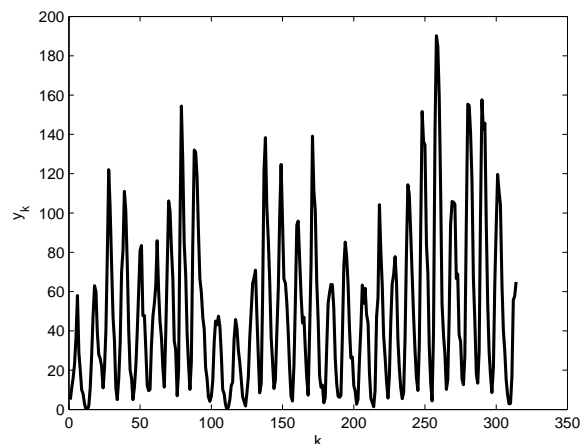


Figura 2: Serie Temporal Sunspot Numbers.

5. Ejemplo

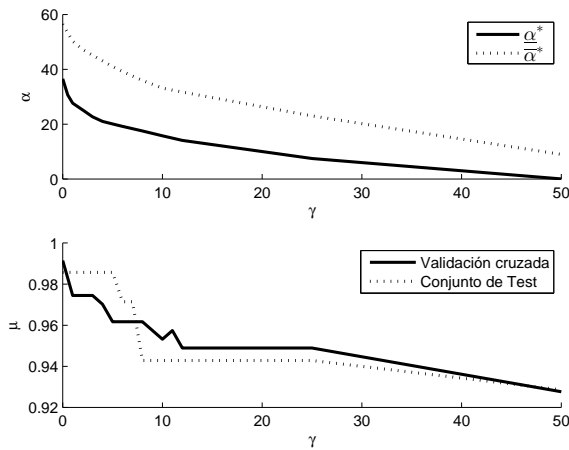
Para ilustrar el nuevo predictor intervalar se ha considerado el problema de predecir una serie temporal denominada Sunspot Numbers (ver Figura 2). Esta serie temporal es interesante ya que es un ejemplo del mundo real, los datos son públicos y su predicción es relevante en muchos campos de aplicación. La serie está compuesta por 314 datos, desde el año 1700 hasta 2013 y reflejan el número de manchas solares presentes. Los primeros 219 datos se han utilizado para construir el conjunto \mathcal{D} . Los restantes 70 datos se han incluido en un conjunto de test. Se ha considerado un predictor a un paso donde $x_k = [y_{k-1} \ y_{k-2} \ \dots \ y_{k-9}]^T$.

En la Sección 4 se ha propuesto un método para estimar el valor del parámetro γ a utilizar. Con el fin de comprobar la efectividad del método se utilizará el conjunto \mathcal{D} y el método basado en validación cruzada presentado en la Sección 4 para estimar el parámetro γ . Finalmente se probará el rendimiento de diferentes valores de γ en el conjunto de test y se comprobará que el mejor valor de γ es muy cercano al estimado mediante validación cruzada y \mathcal{D} .

Se propone una primera métrica que mide el error cometido por la predicción puntual al predecir la serie real, se utiliza la raíz del error cuadrático medio ($RMSE$).

$$RMSE_\gamma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i^* - y_i)^2}. \quad (4)$$

Por otro lado se considera una segunda métrica que mide la anchura de los intervalos de predicción

Figura 3: Coeficiente α^* y parámetro μ .

obtenidos. El índice INT se define mediante

$$INT_{\gamma} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \underline{y}_i).$$

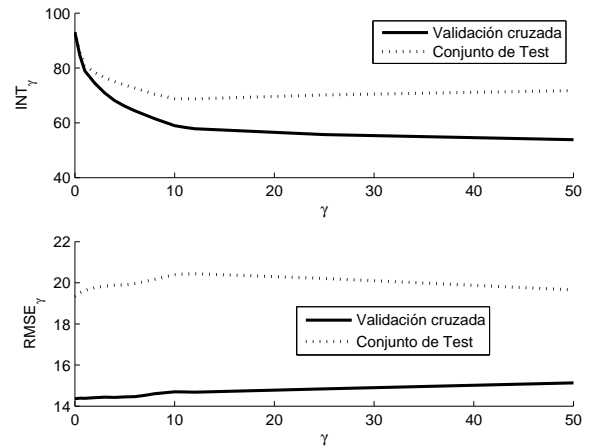
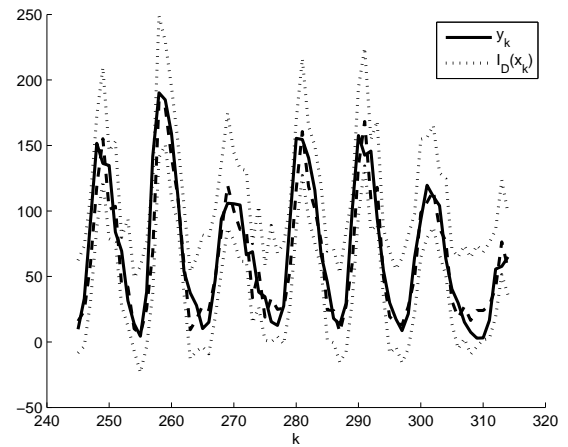
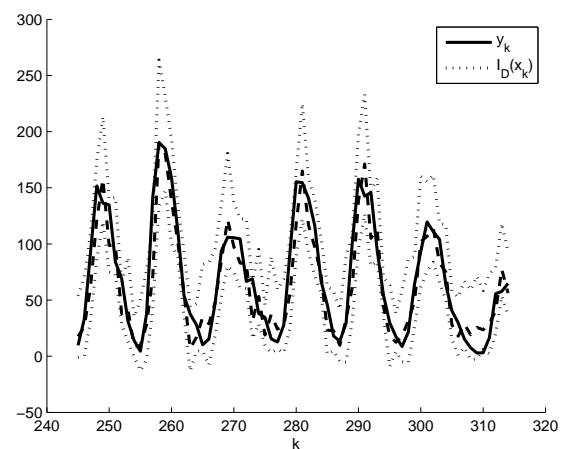
Se propone una métrica BM_{γ} que mide el rendimiento balanceado de las dos métricas INT_{γ} y $RMSE_{\gamma}$. Esta métrica viene definida por la expresión :

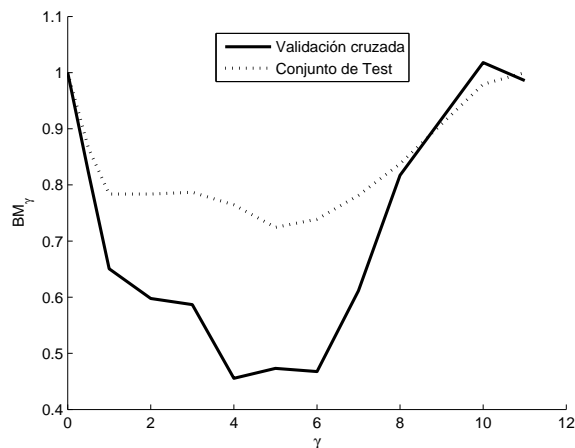
$$BM_{\gamma} = \left(\frac{INT_{\gamma} - \underline{INT}}{\overline{INT} - \underline{INT}} + \frac{RMSE_{\gamma} - \underline{RMSE}}{\overline{RMSE} - \underline{RMSE}} \right)$$

donde \overline{INT} , \underline{INT} , \overline{RMSE} y \underline{RMSE} son los valores máximo y mínimo alcanzado por las métricas INT_{γ} y $RMSE_{\gamma}$.

En la Figura 3 superior se puede ver las evoluciones de los coeficientes óptimos α^* y $\bar{\alpha}^*$ respecto los posibles valores de γ . Cuando $\gamma = 0$, α^* y $\bar{\alpha}^*$ tienen su valor máximo pues en ese caso la predicción puntual viene dada por $\underline{\theta}^* = \bar{\theta}^* = \theta^{LS}$ y son α^* y $\bar{\alpha}^*$ quienes definen la anchura del intervalo. En el otro extremo α^* y $\bar{\alpha}^*$ tienden a cero y son los vectores óptimos $\underline{\theta}^*$ y $\bar{\theta}^*$ quienes definen el intervalo de predicción. En la Figura inferior se representa el valor μ máximo alcanzado para cada valor de γ . Se puede observar que el perfil obtenido por validación cruzada en \mathcal{D} y el obtenido en el conjunto de test es muy parecido. Por otro lado, al incrementarse γ , la predicción intervalar se ajusta más por lo que normalmente se decremanta la \mathcal{D}^{μ} -consistencia obtenida.

En la Figura 4 se comparan las métricas INT_{γ} y $RMSE_{\gamma}$ obtenidas por validación cruzada en \mathcal{D} y las obtenidas en el conjunto de test. Como se puede apreciar los perfiles son muy parecidos. Por otro lado es normal que los valores obtenidos en el conjunto de entrenamiento \mathcal{D} sean mejores que los obtenidos en el conjunto de test, a pesar de usar

Figura 4: Métricas INT_{γ} y $RMSE_{\gamma}$.Figura 5: Predicción intervalar con $\gamma = 4$.Figura 6: Predicción intervalar con $\gamma = 11$.

Figura 7: Métrica BM_γ .

validación cruzada en entrenamiento. También parece razonable que cuando el parámetro de diseño γ crece, la métrica INT_γ mejora y por otro lado $RMSE_\gamma$ empeora. Con el fin de balancear el comportamiento de ambas métricas, se propone BM_γ . Nótese que la métrica $RMSE_0$ sería la obtenida por un modelo autoregresivo AR(9) ajustado mediante mínimos cuadrados.

Fijado $\mu = 0,95$, en la figura 7 se compara la métrica BM_γ obtenida por validación cruzada en \mathcal{D} y las obtenidas en el conjunto de test para los valores $\mathcal{D}^{0,95}$ -consistentes de γ . Como se puede observar el mínimo se obtiene para $\gamma = 4$ en validación cruzada, siendo ese valor también muy cercano al mínimo en el conjunto de test. Por tanto se pueden extraer dos conclusiones. El mejor valor de γ para obtener un balanceo óptimo es un valor intermedio (en este caso γ en torno a 4) y por tanto queda justificado el predictor propuesto. Y la segunda conclusión es que el esquema de validación cruzada propuesto en este artículo, se puede utilizar en este ejemplo para inferir un buen valor de γ .

En la Tabla 1 se muestran los valores extremos de INT_γ y $RMSE_\gamma$ en validación cruzada y test para los valores $\mathcal{D}^{0,95}$ -consistentes de γ .

Cuadro 1: Valores extremos

	INT	INT	$RMSE$	$RMSE$
V.C.	92.8	58.35	14.69	14.36
Test	93.0	68.7	20.42	19.33

Finalmente, en las figuras 5 y 6 se pueden observar las predicciones intervalares (líneas punteadas) obtenidas en el conjunto de test para el valor óptimo $\gamma = 4$ asociado a BM_γ y el valor $\gamma = 11$ que está cerca del límite de la $\mathcal{D}^{0,95}$ -consistencia. Co-

mo se puede observar la predicción intervalar para $\gamma = 11$ tiene menor anchura a costa de incluir cierto desvío en la predicción puntual (líneas discontinuas). Los valores reales se muestran en líneas continuas.

6. Conclusiones

Este trabajo ha presentado una nueva metodología para diseñar predictores intervalares que permitan acotar externamente la salida futura de un sistema dinámico. El método está basado en el concepto de hiperplano soporte. La predicción intervalar se obtiene aplicando un modelo de predicción que se ha identificado resolviendo un problema de optimización convexo. El método incluye un parámetro que permite balancear el tamaño de la predicción intervalar y el error de la predicción puntual. El valor de dicho parámetro se puede estimar utilizando validación cruzada en un conjunto de datos obtenidos del sistema. Como ventajas objetivas del método presentado frente a otras metodologías, se tiene que no es necesario conocer a priori una cota máxima del ruido asociado a una medida, ni tampoco asumir ciertas funciones de distribución aleatorias en dicho ruido. Es importante indicar que ese conocimiento a priori condiciona claramente los resultados obtenidos en esas metodologías alternativas. Finalmente indicar que el método incluye la identificación de modelos lineales mediante mínimos cuadrados como caso particular.

7. Trabajo futuro

En esta sección se establecen algunas líneas de trabajo futuras para mejorar el funcionamiento del predictor. Una primera línea sería incluir pesos en la función de coste de los problemas de optimización (2) y (3). El objetivo de los pesos es obtener planos soporte ajustados en un entorno al vector de interés x_k . La ventaja de esa ampliación sería un mejor ajuste de la predicción intervalar, siendo la principal desventaja el tener que resolver los problemas de optimización (2) y (3) cada vez que se realiza una predicción. Este esquema de trabajo no captura comportamientos locales cuando el conjunto de puntos no es convexo. En ese caso se puede añadir a las variables $\underline{\alpha}$ y $\bar{\alpha}$ un componente local del tipo $\|x_i - x_k\|$ que permite ajustar los planos soporte localmente a zonas de interés. Por otro lado, si se conoce una cota superior del posible ruido presente en las medidas y_i , se puede añadir dicha cota al predictor intervalar para obtener planos soporte más robustos y por tanto ampliar las predicciones intervalares. Estas ampliaciones y otras serán abordadas en próximos

trabajos.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por DPI2013-48243-C2-2-R, DPI2016-76493-C3-1-R y DPI2016-76493-C3-2-R del MEC de España.

Referencias

- [1] T. Alamo, J. M. Bravo, and E. F. Camacho. Guaranteed state estimation by zonotopes. *Automatica*, 41(6):1035–1043, 2005.
- [2] S. Boyd and L. Vandenberghe. *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004.
- [3] J. M. Bravo, T. Alamo, and E. F. Camacho. Robust MPC of constrained discrete-time nonlinear systems based on approximated reachable sets. *Automatica*, 42(10):1745 – 175, 2006.
- [4] J. M. Bravo, T. Alamo, M. Vasallo, and M. E. Gegundez. A general framework for predictors based on bounding techniques and local approximation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, In press, 2017.
- [5] E.F. Camacho and C. Bordons. *Model Predictive Control*. Springer Verlag, 2 edition, 1999.
- [6] Christophe Combastel. An extended zonotopic and gaussian kalman filter (ezgkf) merging set-membership and stochastic paradigms: Toward non-linear filtering and fault detection. *Annual Reviews in Control*, 42:232 – 243, 2016.
- [7] E. Fogel and Y. F. Huang. On the value of information in system identification - bounded noise case. *Automatica*, 18(2):229–238, 1982.
- [8] L. Györfi, M. Kohler, A. Krzyzak, and H. Walk. *A Distribution-Free Theory of Nonparametric Regression*. Springer, 2002.
- [9] W. Härdle. *Applied Nonparametric Regression*. Cambridge University Press, 1992.
- [10] A. Ingimundarson, J.M. Bravo, V. Puig, T. Alamo, and P. Guerra. Robust fault detection using zonotope-based set-membership consistency test. *Int. J. Adapt. Control Signal Process*, 23:311–330, 2009.
- [11] Rolf Isermann. *Fault-Diagnosis systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Springer, 2006.
- [12] Roger Koenker and Jr. Gilbert Bassett. Regression quantiles. *Econometrica: journal of the Econometric Society*, pages 33–50, 1978.
- [13] L. Ljung. *System Identification*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1999.
- [14] M. Milanese, J. Norton, H. Piet-Lahanier, and E. Walter. *Bounding Approaches to System Identification*. Plenum Press, New York, 1996.
- [15] M. Milanese and C. Novara. Set membership prediction of nonlinear time series. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 50(11):1655–1669, 2005.
- [16] A. Vicino and G. Zappa. Sequential approximation of feasible parameter sets for identification with set membership uncertainty. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 41(6):774–785, 1996.

Dynamic simulation applied to refinery hydrogen networks

Aníbal Galán

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Valladolid, Calle Real de Burgos, Sede Mergelina – EII, Valladolid, 47011, anibalsantiago.galan@uva.es

César De Prada

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Valladolid, Calle Real de Burgos, Sede Mergelina – EII, Valladolid, 47011, prada@autom.uva.es

Gloria Gutierrez

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Valladolid, Calle Real de Burgos, Sede Mergelina – EII, Valladolid, 47011, gloria@autom.uva.es

Daniel Sarabia

Departamento de Ingeniería Electromecánica, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos, Avda. Cantabria s/n, Burgos, 09006, dsarabia@ubu.es

Rafael González

Petroleos del Norte, S.A, Petronor, Muskiz 48550, rgonzalezm@repsol.com

Abstract

This study analyses the usefulness of process network dynamics simulation for decision-making in refinery hydrogen networks. A theoretical hydrogen network of three desulphurisation plants is modelled, and three case scenarios discussed: baseline, high demand, and low demand.

Discussion focuses on how the information from the simulation is interpreted and its usefulness for debottlenecking, scheduling and what-if analysis. Stress is put on dynamics of the system and their consequences in process operation throughout the network. Hydrogen purity is highlighted as the most affected variable, and discussed its network wide effect. In addition, the responses of inflows, outflows and headers are analysed.

Although the model used is a simplified representation of the actual processes, the simulation analysis showed potential as decision-making support not provided with steady state models. Further researches based on real case-studies should be conducted to better conclude on the efficient usage of simulation in aiding refinery hydrogen networks operational decisions.

Keywords: network simulation, process dynamics, decision-making.

1 INTRODUCTION

Hydrogen (H₂) is an essential utility in refineries, due to its use as reactant in desulphurisation process

units. Furthermore, environmental regulations limit sulphur content in fuels forcing refineries to produce low sulphur fuels [2, 5, 11-12].

Although less than 10% of the time process units are under transition states, most of the operational deviations, including process safety issues occur then [3]. Hence, simulation of transitions is of key importance in process networks in general and H₂ networks in particular. Interest in the study of transient conditions could minimise the overlooking of process safety. It could lead to unexpected scheduling bottlenecks, for example by delaying on specification products. Other negative effects due to variable H₂ purity could be: high purge rates, reduced catalyst lifecycle and increased rotating machineries malfunction. Simulation can be used for analysis of scenarios, supporting decisions at different levels of operation, aiding in the decision-making process. In fact, increased focus on dynamic modelling and simulation of transition states is seen [1-3, 15]. For instance, in scheduling, process debottlenecking, what-if analysis, flowsheet design, being most of them simulations combined with optimisation [1, 3, 5-8, 10-11, 14-16].

Refinery H₂ networks main components are: gas headers (e.g.: high purity header – HPH -, low purity header – LPH - and fuel gas header – FGH -), hydrotreating plants and their components (e.g.: hydrodesulphurisation plant – HDS -), and H₂ source (e.g.: typically a steam reforming unit). In Figure 1 the arrangement of the network considered in this work is shown. Basically, the network has a H₂ source that serves the consumer plants. However, H₂ should be well in excess to minimise catalyst early decay and suffice compressors safe operation region.

Therefore, reactors outflows are recycled through recycle compressors and consumed gas is fed to comply with units' pressure control. A typical desulphurisation plant is shown in Figure 2.

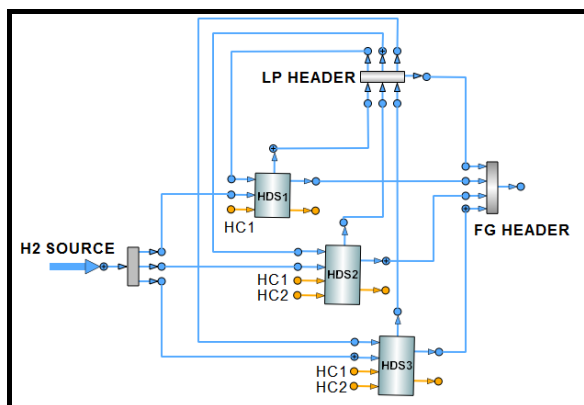


Figure 1: Network topology.

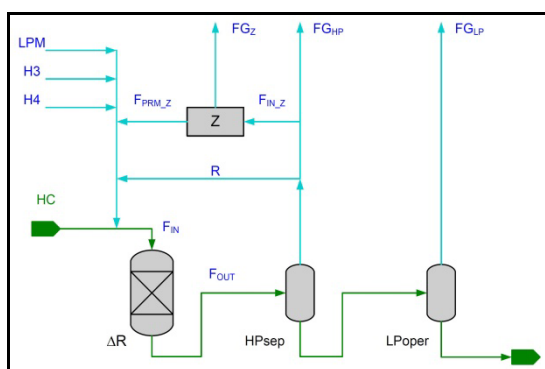


Figure 2: Schematic of a representative hydrotreating unit [5].

This work aims at studying the usefulness of simulation for decision support of refinery hydrogen (H_2) networks during transition states incorporating simplified process dynamics. This is approached through studying three case scenarios of a representative theoretical network with different process condition transitions. Then discussing which are the main variables and how are they affected. Additionally, the main limitations of this methodology are pointed out, as well as some ideas of future research on this topic.

2 METHODOLOGY

2.1 NETWORK TOPOLOGY

A hypothetical network flowsheet was modelled (see Figure 1), comprising the components listed in Table 1. These components were modelled using first principles and specific mass and chemical equations

where applicable (i.e.: reactors and separation drums).

Table 1: Network components modelled.
*Components coded within each HDS. **Only in HDS3.

#	Component
1	H_2 source (HP)
1	HP make-up header (HPMU)
1	LPH (Low Purity Header)
1	FGH (Fuel Gas Header)
3	HDS1/2/3
3	Reactor (R1)*
3	HP drum (SHP)*
3	LP drum (SLP)*
3	Amine column (ACL)*
3	Recycle compressor (RC)*
3	Make-up compressor (C MU)*
1	H_2 purification membrane (PERM)**

Flow diagrams of the HDSs modelled are shown in Figure 3.

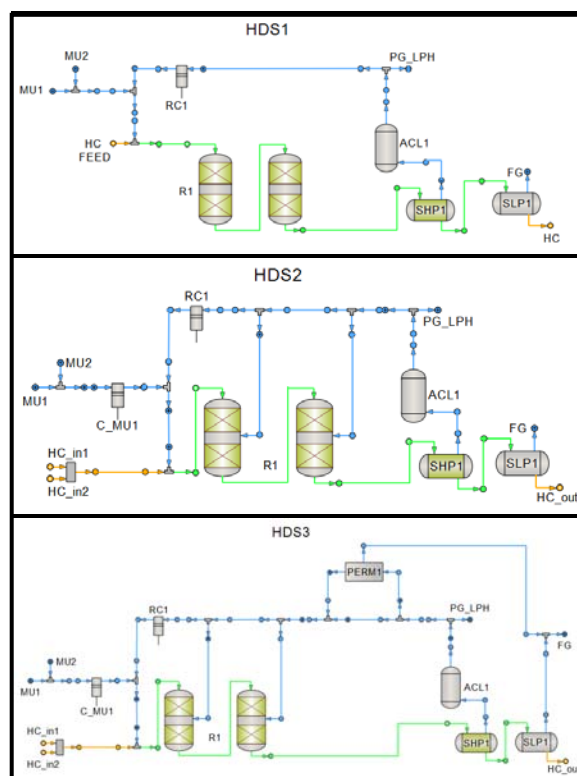


Figure 3: Flow diagram of HDSs 1-3.

2.2 MATHEMATICAL MODEL

Equations used are basically mass and gaseous component balances. In fact, both represented with the general form shown in equations 1-2, meaning that input equals output (except in reactors).

$$\Sigma F_{IN} = \Sigma F_{OUT} \quad (1)$$

$$\Sigma(F_{IN} \times y[H_2]_{IN}) = \Sigma(F_{OUT} \times y[H_2]_{OUT}) \quad (2)$$

Where: F is the volumetric flow (IN / OUT of the system), $y[H_2]$ is the molar fraction of H_2 (IN / OUT of the system)

In reactors, H_2 consumption (H_{2CON}) and LIG generation (LIG_{GEN}) are calculated proportional to HC (see equations 3-4, where: k_{LIGHC} and k_{H_2HC} are the first order reaction constants). In addition, four terms were considered to account for H_2 consumption and LIG generation with their corresponding effect on mass balances, see equations 5-8. Where: H_{2CON} and LIG_{GEN} are H_2 consumed and light ends generated through reactions, G is the HC liquid flow (IN / OUT of the system), LIG_{MW} is the molecular weight of LIGsand

$$H_{2CON} = k_{H_2HC} \times HC_{IN} \quad (3)$$

$$LIG_{GEN} = k_{LIGHC} \times HC_{IN} \quad (4)$$

$$\Sigma F_{IN} - H_{2CON} + LIG_{GEN} = \Sigma F_{OUT} \quad (5)$$

$$\Sigma(F_{IN} \times y[H_2]_{IN}) - H_{2CON} = \Sigma(F_{OUT} \times y[H_2]_{OUT}) \quad (6)$$

$$\Sigma G_{IN} - LIG_{GEN} \times LIG_{MW} = \Sigma G_{OUT} \quad (7)$$

$$\Sigma(F_{IN} \times y[LIG]_{IN}) - LIG_{GEN} = \Sigma(F_{OUT} \times y[LIG]_{OUT}) \quad (8)$$

Separation drums (HP/LP drums) have specific additional equations (9-10) that represent how they split their mixed gas and liquid inlet (G_{IN}) streams into a gas outlet (F_{OUT}) and mixed gas and liquid outlet (G_{OUT}). The latter containing the gases that remain solubilised from the G_{IN} . A solubility constant for: gas in HC and H_2 in HC, should be considered for this behaviour to be useful [6, 13]. In the particular case of LP drums G_{OUT} is free of gases.

$$G_{ASL} = k_{GHC}^s \times HC_{IN} \quad (9)$$

$$G_{OUT} \times y[H_2]_{OUT} = k_{H_2HC}^s \times HC_{IN} \quad (10)$$

Where k_{GHC}^s and $k_{H_2HC}^s$ are the solubilities of gas and H_2 in HC respectively, HC_{IN} is the HC inlet to the drum.

Rather than applying a rigorous model to represent chemical consumption and generation of gases, a simplified empirical first order dynamic is imposed. The same simplification is used to account for solubility dynamics ($k_{H_2HC}^s$, k_{GHC}^s). Therefore, changes in coefficients k_{GHC}^s , $k_{H_2HC}^s$, k_{H_2HC} and k_{LIGHC} , are modelled using equation 11 that represents the generic form of them all. Time constants (τ_i) used were: 0.45 h (τ_{R1}) and 0.65 h (τ_{SHP}), for reactions and separators respectively. These values were deemed sensible for typical HDS processes reaching steady state after 2 h in reactors and 3 h in separation drums [12-13]. One hour delay is included between reactors and downstream drums to account for fluid hydraulic time.

$$Y(t) + \tau_i \times Y'(t) = k \quad (11)$$

Where: Y is a derivable function of time (t) with value k at $t = \infty$, and first derivative Y' . Therefore: k_{GHC}^s , $k_{H_2HC}^s$, k_{H_2HC} and k_{LIGHC} were represented as time dependent coefficients with known steady state values. Transitions were computed applying equation 11 with $\tau_{R1} = 0.45$ h, $\tau_{SHP} = 0.65$ h.

General statistics of the system from PROSIS® [4] are shown in Figure 3.

GENERAL STATISTICS	
INFO	#
Number of equations:	629
Number of boxes (coupled subsystems of equations):	2
Number of linear boxes:	1
Number of nonlinear boxes:	1
Number of input DATA:	22
Number of input BOUNDARY:	47
Number of output EXPLICIT :	611
Number of output DYNAMIC/DERIVATIVE:	12
Number of output ALGEBRAIC:	6
Size of Jacobian matrix (DYNAMIC+ALGEBRAIC):	18x18
Sparsity factor in Jacobian matrix (% of zeros):	62.962962962962962
Default integration method:	DASSL

Figure 3: General statistics of the system. Source: PROOSIS® [4].

2.3 CASES STUDIED

Two state transitions from a baseline case (case1) were simulated: high H_2 demand case (case2) and low H_2 demand case (case3). Process conditions of cases 1-3 are shown in Table 2.

Table 2: Cases process conditions.

Case 1: Baseline				
	k_{H_2HC}	k_{LIGHC}	k_{GHC}^s	$k_{H_2HC}^s$
	Nm ³ /m ³	Nm ³ /m ³	Nm ³ /m ³	Nm ³ /m ³
HDS1	30	1.5	10	6
HDS2	60	5	13	14
HDS3	70	6	14	8
Case 2: High H ₂ demand				
	k_{H_2HC}	k_{LIGHC}	k_{GHC}^s	$k_{H_2HC}^s$
	Nm ³ /m ³	Nm ³ /m ³	Nm ³ /m ³	Nm ³ /m ³
HDS1	35	2	11	7
HDS2	60	4.8	13	9
HDS3	75	6	15	9
Case 3: Low H ₂ demand				
	k_{H_2HC}	k_{LIGHC}	k_{GHC}^s	$k_{H_2HC}^s$
	Nm ³ /m ³	Nm ³ /m ³	Nm ³ /m ³	Nm ³ /m ³
HDS1	25	1	8	4
HDS2	50	4	10	6
HDS3	63	5	13	8

	HC conditions		
	F_{HC}	ρ_{HC}	mw_{HC}
	m ³ /h	kg/m ³	kg/kmol
HDS1			
HC1	150	800	150
HDS2			
HC1	130	800	150
HC2	30	850	170
HDS3			
HC1	105	800	150
HC2	45	850	170

Conversely with reaction and solubility coefficients, network flowrates were fixed (i.e.: set as boundaries) and are shown in Table 3. Therefore, system responses were deemed entirely due to HC properties change rather than operating conditions, such as: feed flowrates, gas purge, etc.

Table 3: Fixed process conditions of the cases studied.

Boundary	Units	HDS1	HDS2	HDS3
MU1.F (from LPH)	km ³ /h	3.0	4.0	1.0
RC1.F (recycle)	km ³ /h	70	70	70
PG.F (purge to LPH)	km ³ /h	3.0	5.0	2.0
Q1.F (Quench 1)	m ³ /h		1.0	1.0
Q2.F (Quench 2)	m ³ /h		1.0	1.0
Z.F (PERM inlet)	km ³ /h			9.0
Z.PG (PERM purge)	km ³ /h			2.0

2.4 SIMULATION

The simulation experiment consisted in running the network at: baseline conditions first, then case2 and case3. The sequence is shown in Table 4.

Table 4: Simulation sequence

Case	Start time (h)	End time (h)
1	0	3
2	3	8
1	8	14
3	14	20
1	20	24

3 RESULTS

3.1 Global mass balance

The mass balance of the network was divided into four terms for ease of understanding.

The first term is the H₂ consumption occurring in reactors due to chemical demand of H₂ (see Figure 4).

The second is H₂ from outside being fed to the network (source) and H₂ purged to FG header. This term is shown in Figure 5.

Similarly, two additional terms referring to LIG fed to the network and purged to FG complete the global mass balance. Figures 6-7 show LIG flow rates for the global balance.

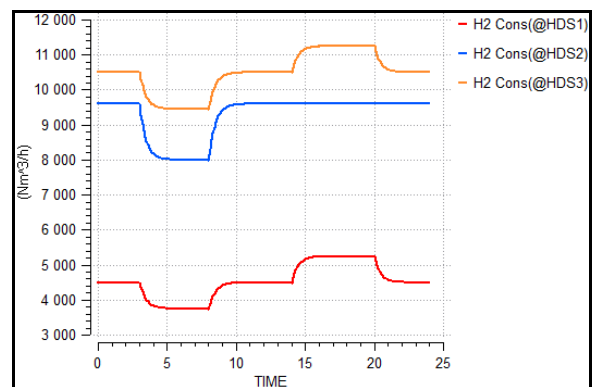


Figure 4: H₂ consumption in reactors.

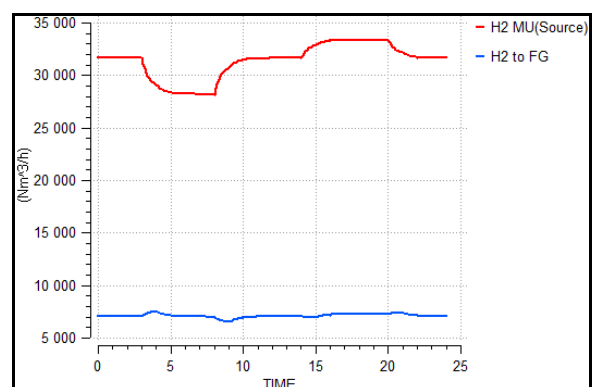


Figure 5: Network H₂ in make-up and purge to FG.

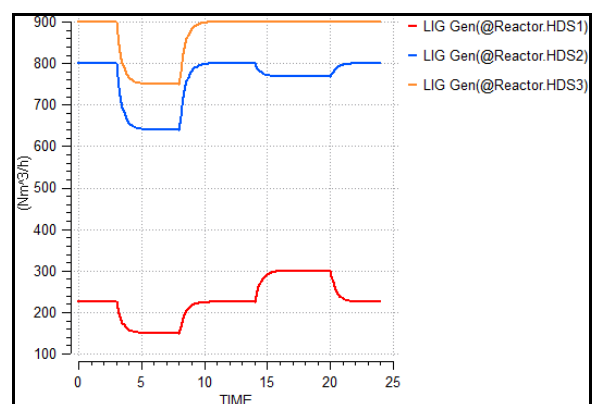


Figure 6: LIG generated in reactors.

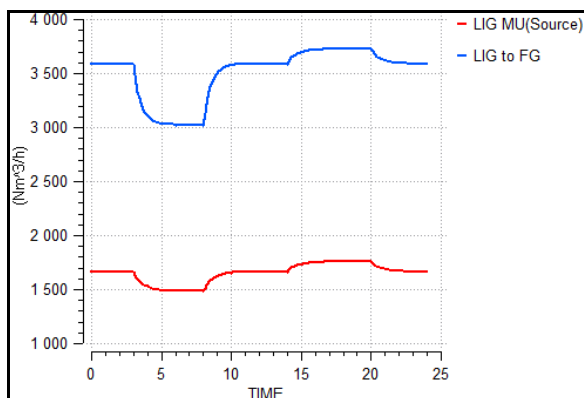
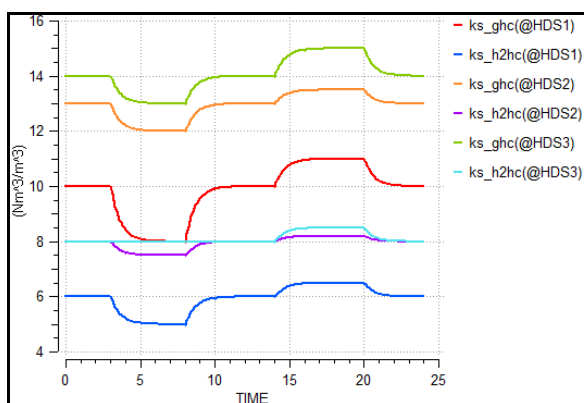


Figure 7: Network LIG in make-up and purge to FG.

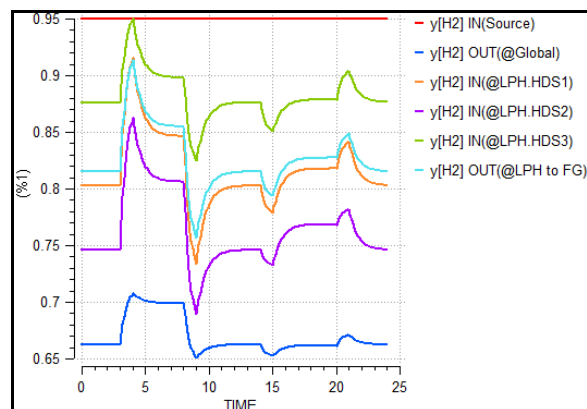
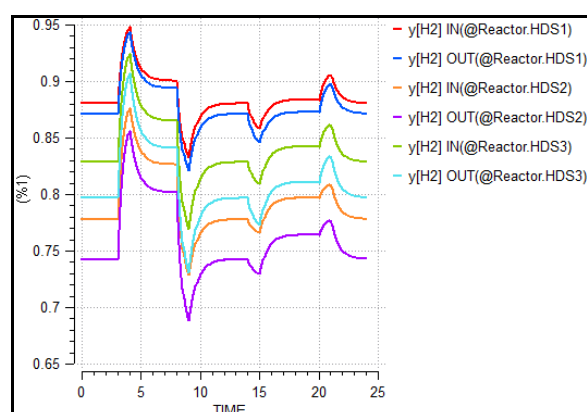
3.2 Solubility coefficients in separation drums

Gas and H_2 solubility coefficients are shown in Figure 8.

Figure 8: Gas and H_2 solubility in HC at separation drums.

3.3 Hydrogen purity

H_2 purity is of key importance in desulphurisation processes, especially to maximise catalyst lifecycle [2, 12-13]. Therefore, is important to control H_2 purity in the network. Figures 9-10 show H_2 purity in the network and its values in reactors.

Figure 9: Network H_2 purities. H_2 purities of: source, purge to FG, LPH inflows and outflow.Figure 10: Reactors' H_2 purities.

4 DISCUSSION

It is seen how H_{2CON} and LIG_{GEN} affect H_2 make-up from the source (Figures 4-5), since the network closes its global mass balance with the make-up gas. Therefore, transitions from case1-2 and case3-2 imply diminutions of make-up flow to the network. The opposite happens with transitions from case2-1 and case1-3. However, H_2 purity ($y[H_2]$) within the network changes in the opposite direction (see Figure 9) due to gas and H_2 solubility dependence (k_{GHC}^s and $k_{H_2HC}^s$, equations 9-10), whose changes are seen in Figure 8. In fact, separators hold responsibility for recycle gas composition in each plant, and consequently within the network. Their influence is due to equations 9-10 which determine the separation in terms of composition and flow rates applying the model proposed by Gomez (2016) [6]. The same response is seen in LIGs, although at different rates (see Figures 6-7). An analogous reasoning explains this behaviour.

A similar analysis can be applied to gas headers, from which LPH and FGH are of particular interest. This is because, the former works as a gas recycle

sink, receiving plants' LPH purges and providing low purity make-up back into the plants (MU1 inflow and PG_LPH outflow, see Figure 3). In the LPH the FG purge to the FGH takes care of the pressure control of the header, closing its mass balance against the FGH. Since three inflows to LPH are boundaries (purges to LPH) and three outflows are boundaries as well (MU1 to HDS1-3), LPH outflow to FGH is fixed by the mass balance in $3000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (expressed in volume in equation 1). In addition, FGH receives plants' purges to FG and from LPH, and again, its pressure control is achieved by purging gas off the network as shown in Figure 11. See Figure 1 for LPH and FGH inflows and outflows diagrams within the network. In overall, LPH gas is a component of actual make-up and FGH outflow is the network's purge, usually to flare header.

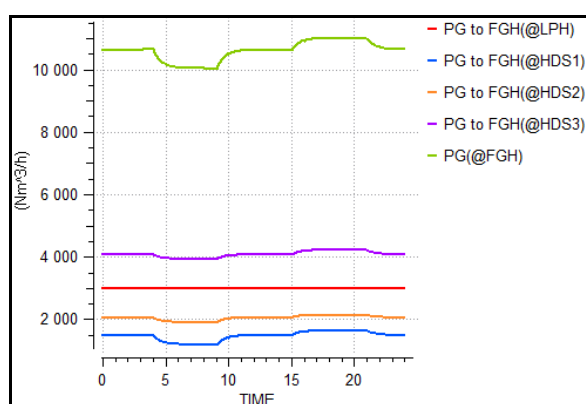


Figure 11: Fuel gas header inflows (PG to FGH) and purge (PG).

H_2 purity in the plants show significant dependence with reactors' specific consumptions (i.e.: $k_{\text{H}_2\text{HC}}$ and k_{LIGHC}) and their dynamics. In fact, from case1-2 an increment of around 20% is seen for HDS1-2 and around 12% for HDS3 (Figure 10). Smaller variations are shown in the rest of the transitions. Therefore the simulation predicts and presents clearly the dynamics of H_2 purity in all streams (see Figures 9-10), being this an asset for plant operators, production scheduling team. For instance, H_2 purity sharp drops and peaks affect negatively scheduling since it may take longer to comply with expected crude processing timetables. Operators will need to smooth down transitions either by feeding lower rates to the units (least likely) or purging more to LPH (most likely). In any case the process will be constrained and will not meet the optimum scheduling unless transition states were known beforehand. In addition, simulation of the network may aid: in debottlenecking (when H_2 is scarce), or in undertaking what-if analysis, due to its ease of setting different scenarios. For example, purity affects (Figures 9-10): compressors performance and catalysts lifecycle. Therefore, it may be challenging

for compressors to deal with transitions from case1-2 and back. Using the network simulation this will be predicted and operators will be able to act in consequence. In overall, simulation of the network holds potential use as support tool in any decision-making process where prediction of network streams' status is utilised. In this theoretical network is seen that case1-2 and case2-1 transitions lead to the most extreme H_2 purities. Although their steady states do not show extreme values, in the transitions H_2 purities reach values that are usually far below minimum required (typical minimum bound: 60%). Therefore, schedulers and operators can anticipate and consider more realistic transition times and how to mitigate their effects. Similar advantages will be seen when studying different scenarios and how the network is likely to respond.

It is important to highlight the limitations of the model and their extent. The results shown rely on the dynamics of the H_2 consumption and LIG generation in the reactors, and gases solubility in the separation drums (equations 3-4, 9-11). Therefore, a proper and specific determination of: $k_{\text{H}_2\text{HC}}^s$, k_{GHC}^s , $k_{\text{H}_2\text{HC}}$, k_{LIGHC} , τ_i would be essential in any actual network case study. In this work only theoretical and sensible values were applied to probe usefulness of the methodology. In addition, the previous parameters are linked to HC composition in actual processes, especially to the sulphur content. This was not modelled.

5 CONCLUSIONS

A first principle refinery hydrogen network that considered empirical first order dynamics on: H_2 consumption, empirical first order dynamics on: H_2 consumption, LIG generation, and solubility in separation drums, was modelled. The simulation of the three cases studied showed transient properties along the network that differ significantly from steady states, bringing essential information for operation. In particular the simulation presented an effective analysis of network dynamics in a simplified and empirical-based fashion. The gas purities were the most significantly affected variables with up to 10% difference between transient and steady state responses. This knowledge is useful for: processing schedule development and normal operation. Other potential usage is identified in minimising compressors operation outside their allowed working region.

Further research on real cases of study should be conducted to validate this methodology, and its utility in the decision-making process in actual refinery hydrogen networks.

Acknowledgements

Financial support is gratefully acknowledged from the Marie Curie Horizon 2020 EID-ITN project "PROcess NeTwork Optimization for efficient and sustainable operation of Europe's process industries taking machinery condition and process performance into account – PRONTO", Grant agreement No 675215. The authors are grateful to Petronor and its management for supporting this study.

References

- [1] Aho M., Bergman S., Hammarström L., Yli-Opas K., Pelkola A., Sourander M., (2009) Closed Loop Dynamic Optimization of a Petroleum Refinery Process, IFAC Proceedings Volumes, Volume 42, Issue 2, pp 257-262, ISSN 1474-6670, <http://dx.doi.org/10.3182/20090506-3-SF-4003.00048>.
- [2] Aydin E., Celebi A., Sildir H., Arkun Y., Canan U., Is G., Erdogan M., (2015) Dynamic modeling of an industrial diesel hydroprocessing plant by the method of continuous lumping, Computers & Chemical Engineering, Volume 82, pp 44-54, ISSN 0098-1354, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.06.005>.
- [3] Chakrabarty A., Mannan S., Cagin T., (2016) Chapter 6 - Dynamic Simulation, Chaos Theory, and Statistical Analysis in Process Safety, In Multiscale Modeling for Process Safety Applications, Butterworth-Heinemann, Boston, pp 289-308, ISBN 9780123969750, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396975-0.00006-1>.
- [4] EAI (2017) PROOSIS® 64 bits ENTERPRISE, Madrid, Spain, Empresarios Agrupados Internacional SA.
- [5] Fonseca A., Sá V., Bento H., Tavares M., Pinto G., Gomes L., (2008) Hydrogen distribution network optimization: a refinery case study, Journal of Cleaner Production, Volume 16, Issue 16, pp 1755-1763, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2007.11.003>.
- [6] Gomez E., 2016, A study on modelling, data reconciliation, and optimal operation of hydrogen networks in oil refineries, Doctoral thesis, University of Valladolid, Spain
- [7] Jia N., Zhang N., (2011) Multi-component optimisation for refinery hydrogen networks, Energy, Volume 36, Issue 8, pp 4663-4670, ISSN 0360-5442, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.040>.
- [8] Kumar A., Gautami G., Khanam S., (2010) Hydrogen distribution in the refinery using mathematical modeling, Energy, Volume 35, Issue 9, pp 3763-3772, ISSN 0360-5442, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.05.025>.
- [9] Moro L., (2009) Optimization in the Petroleum Refining Industry – I The Virtual Refinery, Computer Aided Chemical Engineering, Volume 27, pp 41-46, ISSN 1570-7946, [http://dx.doi.org/10.1016/S1570-7946\(09\)70227-5](http://dx.doi.org/10.1016/S1570-7946(09)70227-5).
- [10] Liu S., Rong G., (2013) Analysis on Refinery System as a Complex Task-resource Network, Chinese Journal of Chemical Engineering, Volume 21, Issue 3, pp 253-262, ISSN 1004-9541, [http://dx.doi.org/10.1016/S1004-9541\(13\)60485-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1004-9541(13)60485-1).
- [11] Micheletto S., Carvalho M., Pinto J., (2008) Operational optimization of the utility system of an oil refinery, Computers & Chemical Engineering, Volume 32, Issue 1, 2008, pp 170-185, ISSN 0098-1354, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2007.05.013>.
- [12] Navia D., Sarabia D., Gutiérrez G., Cubillos F., De Prada C., (2014) A comparison between two methods of stochastic optimization for a dynamic hydrogen consuming plant, Computers & Chemical Engineering, Volume 63, pp 219-233, ISSN 0098-1354, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2014.02.004>.
- [13] Sarabia D., de Prada C., Gómez E., Gutierrez G., Cristea S., Sola J., Gonzalez R., (2012) Data reconciliation and optimal management of hydrogen networks in a petrol refinery, Control Engineering Practice, Volume 20, Issue 4, pp 343-354, ISSN 0967-0661, <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2011.06.009>.
- [14] Pitty S., Li W., Adhitya A., Srinivasan R., Karimi I., (2008) Decision support for integrated refinery supply chains, Computers & Chemical Engineering, Volume 32, Issue 11, pp 2767-2786, ISSN 0098-1354, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2007.11.006>.

- [15] Tran M., Varvarezos D., Nasir M., (2005) The importance of first-principles, model-based steady-state gain calculations in model predictive control—a refinery case study, *Control Engineering Practice*, Volume 13, Issue 11, pp 1369-1382, ISSN 0967-0661, <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2004.11.015>.
- [16] Zhao H., Feng Y., Dong X., Rong G., (2014) Integration Optimization of Production and Utility System for Refinery-wide Planning, *IFAC Proceedings Volumes*, Volume 47, Issue 3, pp 9599-9604, ISSN 1474-6670, <http://dx.doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.02128>.

APROXIMACIÓN DE MODELOS ALGEBRAICOS MEDIANTE ALAMO Y ECOSIMPRO

Carlos G. Palacín, José Luis Pitarch, Gloria Gutiérrez, César de Prada

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid.
C/Real de Burgos s/n, 47011, Valladolid. {carlos.gomez, jose.pitarch, gloria, prada}@autom.uva.es

Resumen

El diseño de modelos apropiados para la simulación es, normalmente, un proceso largo y tedioso; por ello, no es conveniente utilizar el mismo modelo detallado para control y optimización. En la mayoría de los casos, los modelos necesarios para la optimización pueden ser más sencillos siempre y cuando reproduzcan las características principales de los modelos complejos. En este trabajo se ha diseñado un sistema para obtener modelos algebraicos sencillos a partir de un modelado más complejo desarrollado para la simulación.

Palabras clave: simulación, optimización, EcosimPro, ALAMO, modelo subrogado.

1 INTRODUCCIÓN

En los procesos de simulación actuales se ha estimado que los tiempos dedicados a la codificación del sistema son cuatro veces mayores que los dedicados al modelado en sí. Esto es debido a la falta de especialización de los ingenieros de procesos, que han sido preparados en otros ámbitos [1].

Para ello, se han desarrollado nuevas herramientas de modelado y simulación, que ayudan en la codificación del sistema, incorporando sus propios lenguajes de programación de un nivel mucho mayor que los lenguajes clásicos. Dichas herramientas de modelado y simulación (e.g., EcosimPro, Dymola [2]) se han diseñado buscando un entorno que facilite la creación de modelos estacionarios y dinámicos de manera rápida e intuitiva. Sin embargo, carecen de buenas herramientas de optimización y, en la mayoría de los casos, hay que hacer uso de software externo. Esto conlleva un gran trastorno para el usuario que puede tomar dos caminos: puede volver a generar el mismo modelo en un entorno diferente, que puede no ser posible exactamente por peculiaridades de cada lenguaje; o bien puede crear un nuevo modelo personalizado, que facilita las tareas de codificación, pero añade una nueva etapa necesaria de validación sobre el sistema real.

Hay que tener en cuenta que los modelos apropiados para simulación deben representar fielmente los comportamientos dinámicos de los sistemas, a fin de poder servir como banco de pruebas, y comprender mejor el proceso que se está llevando a cabo.

Por otro lado, los modelos usados en optimización pueden ser juzgados de una manera más laxa en cuanto a similitud con el sistema real, puesto que no es necesario representar todo el proceso, sino únicamente las variables importantes para el estudio, o bien, sólo el comportamiento en estacionario frente a la dinámica total, si el tiempo del transitorio del sistema es muy breve en comparación con la duración del proceso global. Por otro lado, si se busca obtener herramientas de optimización en tiempo real, la ejecución rápida del código debe primar sobre la exactitud en el cálculo.

El resto del artículo se distribuye de la siguiente manera, en la siguiente sección se indican las herramientas externas utilizadas en detalle. En la sección 3 se describe la interfaz diseñada, y en la sección 4 se amplía el diseño inicial incluyendo paralelismo. En la sección 5 se presentan dos casos prácticos de uso. Finalmente, se finaliza el artículo con las conclusiones y posibles líneas de mejora.

2 SOFTWARE EMPLEADO

En este trabajo se han empleado como herramientas software concretas el entorno de modelado y simulación **EcosimPro**, de Empresario Agrupados, y la herramienta de estimación de modelos **ALAMO** [3], desarrollada en la universidad *Carnegie Mellon*.

2.1 EcosimPro

EcosimPro es una potente herramienta de simulación y modelado de sistemas continuos y discretos. Posee su propio lenguaje de programación de alto nivel basado en el paradigma de la orientación a objetos, **EL (EcosimPro Language)**. Además, permite realizar dicha programación tanto en un modo textual como en un modo gráfico. Por otro lado, gracias a la

orientación a objetos, es posible diseñar sistemas complejos usando código programado anteriormente tanto en forma de componentes de un sistema mayor, como en forma de clases con métodos y variables propias. EcosimPro permite su instalación tanto en sistemas operativos Windows como Linux. Reduciendo, o incluso eliminando, las limitaciones para compartir librerías desarrolladas en distintos equipos o en distintas instalaciones. Esto permite además, disponer de equipos de trabajo especializados en el modelado de librerías de bajo nivel, y otros equipos que desarrollan sistemas más complejos que hagan uso o demanden estas.

2.2 ALAMO

Por su parte, ALAMO es un software que busca identificar ecuaciones algebraicas sencillas que relacionen las entradas y las salidas de sistemas de caja negra. Para ello plantea un problema mixto-entero que debe minimizar el error del valor devuelto por la función propuesta frente al valor real de la variable. La ecuación solución consiste en una combinación de funciones algebraicas base.

Para la obtención de la combinación óptima, ALAMO hace uso del software externo GAMS, para la resolución de los problemas de programación mixta-entera lineal y cuadrática planteados. El algoritmo de resolución que se emplea se puede seleccionar, siendo el valor predefinido y aconsejado el algoritmo BARON. En caso de que GAMS no se encuentre disponible en el sistema donde se ejecuta, se utilizarán enfoques enumerativos para la optimización combinatoria. [4], que pueden alargar el tiempo de resolución en problemas de gran escala, y hacer que el modelo subrogado obtenido no sea preciso y/o fiable.

La interfaz de ALAMO es un punto débil importante del programa. Las llamadas tienen que hacerse mediante línea de comandos, mientras que la comunicación de datos de entrada y salida se realiza mediante ficheros de texto plano. Por ejemplo, en el fichero de entrada se debe especificar el número de variables de entrada que tiene el sistema, y el número de salidas que se deben estimar. Además se pueden indicar los nombres de las variables de entrada del sistema y de las variables a calcular. En caso de no indicar los nombres, el programa por defecto etiquetará con una letra “x” seguida de un índice numérico las entradas y con una letra “z” seguida, igualmente, de un índice numérico las salidas.

En el fichero de entrada se deben introducir también las funciones base elegidas, con las que el programa debe intentar ajustar la curva de salida. Una vez ejecutado, ALAMO presenta varias soluciones que disminuyen el error pero incrementan la dificultad

añadiendo más funciones o aumentando la complejidad de éstas.

ALAMO está preparado para el trabajo con datos obtenidos de planta, que deben introducirse en el fichero de entrada en columnas ordenadas donde las primeras columnas serán los valores de las entradas y las siguientes los de las salidas, en el mismo orden que se han indicado los nombres de estas. Sin embargo, también se permite el trabajo con simuladores, que deben responder a una sintaxis muy concreta en la llamada.

3 DISEÑO DE LA INTERFAZ

En esta sección se definirá la interfaz implementada que permite realizar la llamada desde ALAMO empleando los modelos codificados en EcosimPro. Inicialmente se debe desarrollar el modelo completo en EcosimPro, que puede ser tanto dinámico como estacionario, a este modelo se le denomina componente en lenguaje EL. Una vez que se tiene el componente, se definen las llamadas particiones, que son la traducción a lenguaje matemático y conllevan también la obtención de código en el lenguaje C++.

Todas las particiones heredan de una clase padre, por lo que tienen la misma interfaz. Esta ofrece funciones que permiten escribir y leer el valor de variables. También incluye llamadas para indicar tiempos de simulaciones, o el cálculo del estacionario. En nuestro caso se hará uso de este último. Esta implementación de la herencia nos permite minimizar los cambios que se deben realizar en el código por el usuario al mínimo, utilizando punteros a la clase padre e inicializando en cada caso a la partición concreta, como se indica en la Figura 1.

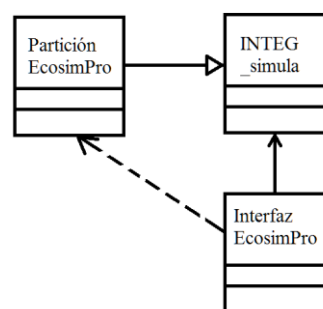


Figura 1. Implementación llamada EcosimPro

Con las particiones iniciadas al modelo concreto, se compila el ejecutable que se ha definido con la interfaz que necesita ALAMO. Este tiene que leer de un fichero de texto que el programa de estimación genera, donde indica una serie de valores que las variables de entrada deben tomar, y genera un fichero de salida con la respuesta del sistema.

Para facilitar el uso por el ingeniero de procesos, se han desarrollado una serie de funciones que permiten la creación del fichero de texto plano de configuración que requiere ALAMO como entrada, desde un experimento de EcosimPro. Más tarde, este fichero de configuración se utilizará para generar el simulador de manera automática y no tener que realizar la introducción de las variables de manera manual en distintos puntos, lo que disminuye la posibilidad de fallos humanos. Del mismo modo, se han implementado funciones de llamada para permitir la ejecución del estimador desde el mismo programa EcosimPro, a fin de poder observar las funciones respuesta sugeridas por el estimador.

4 SIMULACIÓN CONCURRENTE

Gracias a las arquitecturas actuales de los procesadores multinúcleo, que incluso pueden llegar a incorporar varios núcleos lógicos dentro de un mismo núcleo físico, se puede conseguir la ejecución concurrente de procesos. Existen diversos enfoques en la programación paralela: siendo los más usados las llamadas a las instrucciones del sistema operativo; y la utilización de directivas especiales ofrecidas por los compiladores actuales.

Históricamente, la paralelización se basaba en la ejecución multiproceso [5]. En esta versión, es necesaria la existencia de varios núcleos para tener concurrencia real. Cada proceso dispone de su propio espacio en memoria para el almacenamiento del código y de los valores de las variables. Existe un proceso padre que crea tantos procesos hijos como desee, siendo el número máximo adecuado el número de núcleos menos uno. Todos comparten el mismo código, variando en su número de identificación de proceso. Al no tener memoria en común, es importante indicar previamente las zonas de memoria que se deben compartir para el paso de variables, o el acceso a la misma.

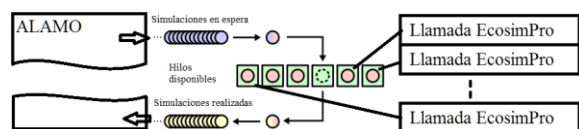


Figura 2. Implementación de la concurrencia

Una versión más actual es la implementación multihilo [6], donde un proceso padre genera tantos hilos como necesite. En este caso todos los hilos comparten la memoria, haciendo más sencillo el paso de parámetros, pero también necesario evitar que varios hilos accedan a la misma variable a la vez. Esto implica la necesidad de implementar algoritmos de reserva de recursos y prioridades, evitando que un dato pueda sufrir accesos concurrentes.

Actualmente se está desarrollando una nueva vertiente denominada paralelización por tareas [7], donde no se impone el código que debe ejecutar cada hilo, sino que se indican las tareas que se pueden realizar de manera concurrente y el número de hilos para ejecutarlas. El sistema repartirá tantas tareas pendientes de la lista como hilos creados haya entre los núcleos lógicos del sistema, cuando un hilo finaliza su ejecución, y en caso de que la pila de tareas pendientes aún no haya finalizado, recibirá otra tarea. De esta manera se pueden conseguir implementar programas paralelos con mayor eficiencia con independencia del número de núcleos disponible en el equipo donde se ejecute, puesto que el número de tareas a distribuir siempre será el mismo, y el de hilos puede llegar a ser máximo admitido por el equipo. Para poder ejecutar este paradigma de programación paralela en el lenguaje C++ es necesario utilizar herramientas externas que implementen a bajo nivel el reparto de los núcleos de los procesadores entre los hilos creados, y asignen las tareas a estos. Dos posibles opciones son la: librería Threading Building Blocks (TBB) desarrollada por Intel [8]; o la biblioteca Qt [9], que ofrece clases especiales, como *QThreadPool*, para codificar dicha implementación.

En el caso de la interfaz presentada, el programa de estimación de modelos da una serie de combinaciones de las variables de entrada y espera recibir sendos valores de las salidas del sistema estimadas. Por lo tanto, es necesario lanzar la simulación ese mismo número de veces. Debido a que cada simulación es independiente de las demás, todas podrían ejecutarse de manera concurrente. Para implementar esta paralelización se ha definido como tarea la ejecución de la simulación, y se ha utilizado el paradigma de la paralelización de tareas. Un pequeño diagrama se puede ver en la Figura 2.

5 RESULTADOS

El enfoque integrado propuesto se ha utilizado en dos ejemplos prácticos para comprobar su eficiencia: inicialmente un modelo de un reactor químico, usado principalmente como banco de pruebas; y posteriormente sobre un modelo más complejo de una planta de evaporación industrial real. La respuesta seleccionada no es en todos los casos la que minimiza el error con la respuesta del sistema¹, en algunos casos se ha balanceado la precisión con complejidad del modelo subrogado.

¹ Aumentar la precisión implica aumentar la complejidad y/o el número de las funciones base seleccionadas por ALAMO, pudiendo reducir la robustez del modelo.

5.1 REACTOR CONTINUO

Se dispone de un reactor químico de flujo continuo, donde un reactivo A se convierte en un producto B mediante una reacción exotérmica. Para mantener el reactor en un estado estable es necesario, por lo tanto, enfriarlo, lo cual se consigue mediante una camisa refrigerante.

5.1.1 MODELO DEL REACTOR

A continuación se presentan las ecuaciones diferenciales del modelo dinámico de simulación del reactor.

$$V \cdot \frac{dC_A}{dt} = q \cdot (C_{A0} - C_A) - V \cdot k \cdot C_A \quad (1)$$

$$V \cdot \rho \cdot C_P \cdot \frac{dT}{dt} = q \cdot \rho \cdot (T_e - T) - V \cdot k \cdot C_A \cdot \Delta H - Q \quad (2)$$

$$V_r \cdot \rho_r \cdot C_{Pr} \cdot \frac{dT_r}{dt} = F_r \cdot \rho_r \cdot C_{Pr} \cdot (T_{re} - T_r) + Q \quad (3)$$

$$k = 5,967 \cdot e^{\frac{-826}{T+273,15}} \quad (4)$$

$$Q = U \cdot A \cdot (T - T_r) \quad (5)$$

$$x = \frac{C_B}{C_{A0}} \equiv \frac{C_{A0} - C_A}{C_{A0}} \quad (6)$$

Donde:

V : Volumen del reactor (m^3)
 V_r : Volumen de la camisa refrigerante (m^3)
 C_A : Concentración de A en el reactor (kg/m^3)
 C_{A0} : Concentración de A en la alimentación (kg/m^3)
 q : Flujo volumétrico de alimentación (m^3/h)
 F_r : Flujo volumétrico del refrigerante (m^3/h)
 k : Constante cinética de la reacción ($1/h$)
 ρ : Densidad corriente de alimentación (kg/m^3)
 ρ_r : Densidad del refrigerante (kg/m^3)
 C_P : Capacidad calorífica de la mezcla ($kJ/kg \cdot K$)
 C_{Pr} : Capacidad calorífica del refrigerante ($kJ/kg \cdot K$)
 T : Temperatura del reactor ($^{\circ}C$)
 T_e : Temperatura de entrada de la alimentación ($^{\circ}C$)
 T_r : Temperatura media del refrigerante ($^{\circ}C$)
 T_{re} : Temperatura de entrada del refrigerante ($^{\circ}C$)
 ΔH : Calor de reacción (kJ/kg)
 Q : Calor intercambiado (kJ/h)
 U : Coef. global de transmisión de calor (kJ/hm^2K)
 A : Superf. de transmisión de calor de la camisa (m^2)
 x : Ratio de conversión de A en B (adimensional)

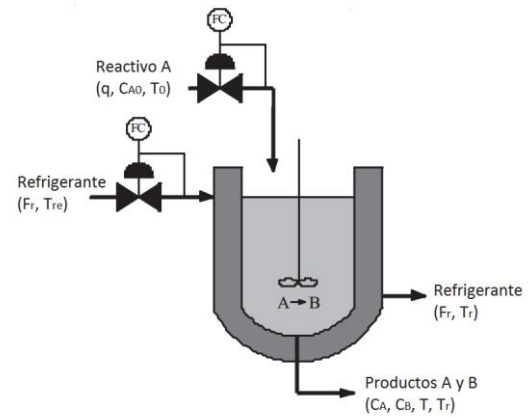


Figura 3. Esquema del reactor

5.1.2 MODELO ESTIMADO

Las variables controlables son el caudal de entrada del reactivo y el flujo del refrigerante, por lo que serán las variables de entrada que se deben indicar a ALAMO. Por otro lado, se desea maximizar la concentración del producto a la salida, manteniendo la temperatura dentro de los límites permitidos. Por consiguiente, las funciones a estimar son el caudal del producto a la salida, y la temperatura en el interior del reactor. Esta solución sirve para buscar el punto de trabajo en el estacionario, dejando de lado el control de la dinámica del sistema que se supone existente. Las respuestas obtenidas se muestran junto a los valores de la simulación en la Figura 4 y la Figura 5, donde en el eje de coordenadas se puede ver el valor de la variable en sí, y el eje de abscisas representa combinaciones de las variables de entrada.

$$C_B = -1,2 \cdot q + 0,21 \cdot q^2 - 0,15 \cdot 10^{-1} \cdot q^3 + 0,18 \cdot 10^{-6} \cdot F_r^{-3} - 0,43 \cdot 10^{-2} \cdot q \cdot F_r + 0,23 \cdot 10^{-5} \cdot (q \cdot F_r)^2 + 14 \quad (7)$$

$$T = 26 \cdot q + 1,9 \cdot \ln(q) - 21 \cdot \ln(F_r) - 0,97 \cdot q^2 + 0,23 \cdot 10^{-2} \cdot F_r^2 - 0,18 \cdot q \cdot F_r + 0,84 \cdot 10^{-4} \cdot (q \cdot F_r)^2 + 100 \quad (8)$$

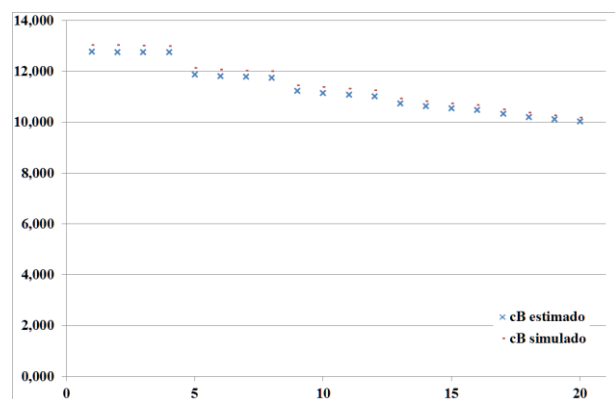


Figura 4. Caudal de producto a la salida

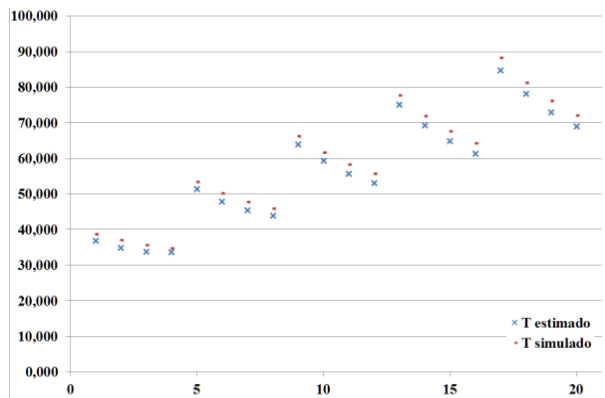


Figura 5. Temperatura del reactor

5.2 PLANTA DE EVAPORACIÓN

El sistema a estimar consiste en una planta de evaporación industrial. El sistema debe evaporar una cantidad fija de agua de una disolución de ácidos y sales, a fin de mejorar la cristalización posterior de dicha disolución. El sistema consta de una serie de intercambiadores de calor iniciales para incrementar la temperatura del líquido y, después, una combinación de cámaras de evaporación. Un pequeño diagrama del sistema se puede ver en la Figura 6. Para calentar el producto se emplea inicialmente el vapor obtenido en las cámaras de evaporación 1 y, en los últimos intercambiadores, vapor vivo, cuyo consumo se desea reducir a fin de economizar el proceso.

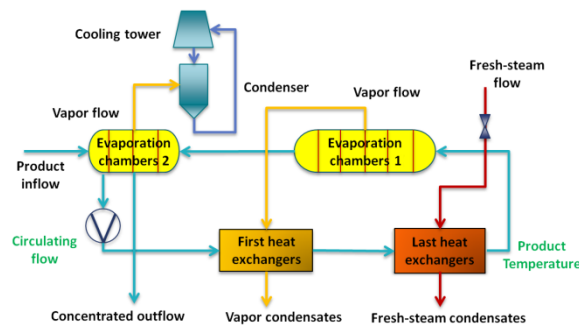


Figura 6. Diagrama de la línea de evaporación

Las variables controladas son la temperatura del producto a la salida de los intercambiadores y el caudal de recirculación. Por lo tanto, dichas variables serán los parámetros de entrada que se indicarán al estimador. Puesto que se desea reducir el consumo de vapor específico, éste, junto con el caudal de agua evaporada, serán las variables que se deben estimar. Igualmente, la solución obtenida sirve para el sistema estacionario, no prestando atención a la dinámica del sistema, mucho más rápida. La comparación entre los valores devueltos por la simulación y los estimados por el modelo subrogado se muestran en la Figura 7 y la Figura 8, donde nuevamente el eje de coordenadas

representa el valor de la variable y en el eje de abscisas se indican las combinaciones de entradas.

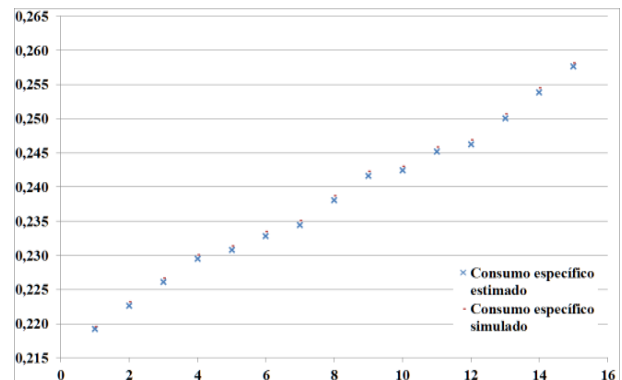


Figura 7. Consumo específico de vapor

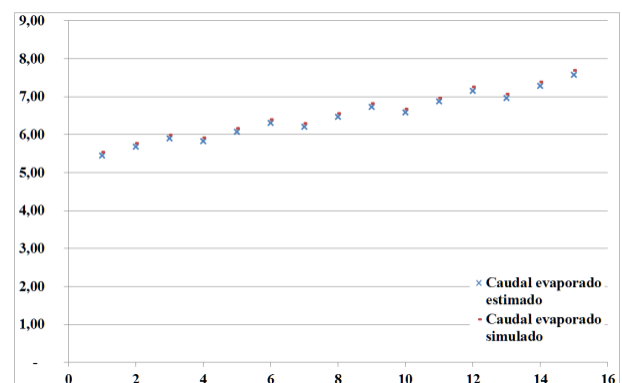


Figura 8. Caudal de agua evaporada

Las ecuaciones del modelo completo han sido omitidas por brevedad. Se emplaza al lector que así lo desee a consultar el modelo completo en [10].

5.2.1 MODELO ESTIMADO

$$SSC = 0,82 \cdot 10^{-3} \cdot R_F + 0,74 \cdot 10^{-2} \cdot \ln(O_T) + 0,38 \cdot 10^{-5} \cdot O_T \cdot R_F \quad (9)$$

$$E_F = 0,34 \cdot 10^{-6} \cdot O_T^3 - 0,17 \cdot 10^{-6} \cdot R_F^3 + 0,41 \cdot 10^{-3} \cdot O_T \cdot R_F \quad (10)$$

Donde:

SSC : Consumo específico de vapor (adimensional)

R_F : Caudal de recirculación (kg/s)

O_T : Temperatura de salida de los intercambiadores (°C)

E_F : Caudal de evaporación (kg/s)

6 CONCLUSIONES Y LINEAS DE TRABAJO FUTURAS

Se ha desarrollado una interfaz para la obtención de modelos simplificados adecuados para la optimización partiendo de modelos complejos. Estos modelos se han generado previamente con un enfoque en la simulación de procesos. Además, se ha comprobado su eficacia en varios sistemas.

Se han mejorado los tiempos de cómputo necesarios inicialmente incluyendo una implementación que hace uso de técnicas de paralelismo.

Aunque el sistema es relativamente sencillo de editar, se pretende incorporar una interfaz gráfica que facilite aún más dicha tarea. De esta manera, el operario podrá usar el sistema sin necesidad de utilizar otro programa que el simulador.

También se está trabajando en una versión que permita obtener modelos subrogados de las dinámicas del sistema, lo que implica añadir el tiempo como variable de entrada y el tratamiento de un número mayor de datos y simulaciones. Esta versión del programa permitirá obtener modelos útiles para optimizaciones dinámicas.

Por otro lado, aunque la simulación es el mayor consumidor de tiempo en la ejecución del programa, la lectura de ficheros, también supone un cuello de botella, por lo que la paralelización de tareas se podría aumentar a la lectura del mismo, puesto que las primeras simulaciones no deben esperar a que el fichero se haya terminado de leer para empezar a ejecutarse. Para esto habría que añadir restricciones en el acceso a variables mediante la implementación de semáforos de acceso a un vector con los valores

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el programa de innovación y desarrollo de la Unión Europea

Horizonte 2020, proyecto CoPro (contrato nº123575) y por el Gobierno de España con fondos MINECO /FEDER (DPI2015-70975-P).

Referencias

- [1] *EcosimPro. Dynamic Modeling & Simulation Tool*. EA International.
<http://www.ecosimpro.com>
- [2] Cellier, F. E. "Dymola: Environment for object-oriented modeling of physical systems." Lund, Sweden: Dassault Systemes AB 2015.
- [3] Cozad, Alison, N. V. Sahinidis, and David C. Miller. "Alamo: Automatic learning of algebraic models for optimization." American Institute of Chemical Engineers, 2013 Annual Meeting, San Francisco. 2013.
- [4] Ibaraki, Toshihide. Enumerative approaches to combinatorial optimization. Baltzer, 1987.
- [5] Almasi, George S., and Allan Gottlieb. "Highly parallel computing." 1988.
- [6] Alverson, G. A., Charles, D. C. I., Kahan, S. H., Koblenz, B. D., Porterfield, A., & Smith, B. J. "Synchronization Techniques in a Multithreaded Environment." U.S. Patent No. 6,862,635. 1 Mar, 2005.
- [7] Yang, Gang, Xingshe Zhou, and Huifang Pan. "Feedback-based Framework of Adaptive Threads-pool Management." Computer Engineering 21, 2006: 65-67.
- [8] Reinders, James. Intel threading building blocks: outfitting C++ for multi-core processor parallelism. "O'Reilly Media, Inc.", 2007.
- [9] Summerfield, Mark. Advanced Qt Programming: Creating Great Software with C++ and Qt 4. Pearson Education, 2010.
- [10] Pitarch, J. L., Palacín, C. G., De Prada, C., Voglauer, B., & Seyfriedsberger, G. "Optimisation of the resource efficiency in an industrial evaporation system." Journal of Process Control 56, 2017: 1-12.

A Causal Model to Analyze Aircraft Collision Avoidance Deadlock Scenarios

Miquel Àngel Piera Eroles^(a)
^(a)miquelangel.piera@uab.cat

Julia de Homdedeu^(b), Maria del Mar Tous^(c), Thimjo Koca^(d), Marko Radanovic^(e)

^{(a),(b),(c),(d),(e)} Department of Telecommunications and Systems Engineering
 Autonomous University of Barcelona
 Barcelona, Spain

^(b)juliade.homdedeu@e-campus.uab.cat, ^(c)mariadelmar.tous@e-campus.uab.cat,
^(d)thimjo.koca@uab.cat, ^(e)marko.radanovic@uab.cat

Abstract

Continuous increase in the traffic density over the certain en-route sectors provokes many situations in which a loss of separation minima (SM) between two aircraft occurs. Although, this loss is predicted well in advance, giving a proper look-ahead time (LAT) for a detection function, the resolution of such an event may lead to a new conflict situation due to dynamics of surrounding traffic aircraft. A multi-agent system framework can deal with these cases. This work presents three different complexity indicators that can be used to shape the social behavior of the agents. Simulation results show that the proposed indicators can suggest drastically different nature of the same ecosystem, therefore further investigation of the correlation of the proposed indicators to the actual complexity is necessary.

Keywords: ecosystem, feasible solutions, opportunity costs, conflict maneuvers

1 INTRODUCTION

Continuous increase in the traffic density over the certain en-route sectors provokes many situations in which a loss of separation minima (SM) between two aircraft occurs [2,4]. Although, this loss is predicted well in advance, giving a proper look-ahead time (LAT) for a detection function, the resolution of such an event may lead to a new conflict situation due to dynamics of surrounding traffic aircraft [5,8]. Namely, some resulting maneuvers of the conflicting aircraft can induce new loss of SM with nearby aircraft in which new LAT for detection can be significantly reduced. Consequently, a collision risk in this case is often at a higher level, which usually requires more demanding avoidance maneuver for

the pilot-in-command, generating also inefficient trajectory segments.

At present, an upgraded Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS II v7.1), has been designed for operations in the traffic densities of 0.3 aircraft per squared nautical mile [1,8]. It demonstrates excellent performances for the pairwise encounters, as well as the great improvements for multi-thread encounters, taking different flight configurations (cruising and evolving aircraft) into considerations. However, a TCAS logic shows some operational drawbacks due to limited number of resolution advisories, currently resulting in the vertical flight profile change only [3,7]. Moreover, the well reported induced collisions in many traffic scenarios show a high probability of occurrence. Thus, there is a challenge to investigate and implement a new operational framework which will improve and extend TCAS functionalities at both tactical and operational level.

This paper relies on a new research in the ATM automation framework: the concept of ecosystems [1,6]. Ecosystem presents a set of aircraft, with self-automated capabilities, that form a cost-efficient separation management system for finding the best compromise in resolution trajectories. The goal is to transform the ecosystem aircraft into intelligent agents that can communicate with each other to safely make the best use of existing airspace capacity. The concept has been developed to handle a robust conflict management process considering aircraft performances, and consistent solutions in front of the scalability problems.

The study introduces the importance to analyze the interdependencies between aircraft to predict the available time for a negotiation process between the air space users involved in the surrounding traffic of

a conflict before a compulsory resolution is issued by the air traffic controller (ATC).

2 BACKGROUND

The current ATM is basically a ground-based system with different levels of operational management tasks: Airspace Management; Air Traffic Flow and Capacity Management (ATFCM), which is also in charge for the Trajectory Management (TM); and finally, Separation Management (SM), developed by the ATC, in order to provide safe and smooth operations for all airspace users.

Additionally, for those situations when the ATC has been unable to remove conflicts and a separation management infringement occurs, a different safety net exists for collision avoidance (CA). This safety net is independent from ATC and is an “on board”, pairwise based and coordinated resource. Currently is conducted by the TCAS/ACAS.

Nowadays, the transition from the SM function to TCAS is done in a disruptive manner by means of the issuance of a TCAS Resolution Advisory (RA). As a result, crew shall suddenly stop following controller instructions and follow those provided by the on-board system. That involves important operational discontinuities and a very poor level of integration between both safety management layers, SM and CA. Furthermore, when facing a CA situation, the TCAS safety net recognises that for aircraft (A/C) densities above $0.3 \text{ A/C} / \text{NM}^2$, a sequential pairwise resolution can induce collateral conflicts in surrounding areas. Therefore, conventional and pairwise CR for clusters (CL) of aircraft is highly limited and dependent of the traffic density and complexity.

Besides, for the future ATM system, the Performance Based Operation (PBO) concept proposes a higher degree of integration between A/C operation management levels and actors, promoting more dynamic task allocations and continuity between them. The TM is understood an activity performed before A/Cs are flying, devoted to deliver agreed flight plans among all the stakeholders, whereas SM is assumed as those reactive measures to be implemented anytime and anywhere the separation minima between an A/C and a hazard is under risk. The TM and the SM functions continuously conduct a trade-off between efficiency and safety in order to avoid jeopardising the performance of the system but maintaining high safety levels.

AGENT project is devoted to facilitate the integration between SM and CA activities, questioning the current fixed task allocation on the ground for separation management, and on the air for

autonomous collision avoidance. To this end, a **proactive SM management** is proposed supported by multi-agent task allocation, where the “separator’s” function will be performed by the ATC, but A/Cs involved in the safety issue will have an active role in the decision making process through a negotiation process supported by agent technologies. In addition, AGENT also seeks for an enhanced integration among the TM and SM layers by means of a more efficient delivery of trajectory changes (TM) or manoeuvres (SM), for simultaneously planning the resolution of all detected conflicts and potential induced collisions for all aircraft in an efficient and agreed manner.

Agent technology provides the baseline for the implementation of a **flight efficient, safe collaborative and supervised separation management**, operationally integrated with **trajectory management** and **collision avoidance** within a PBO concept. In order to enhance the use of a MAS (Multi Agent Simulation) model to validate a more pro-active role of airspace users in conflict resolution tasks through a negotiation process, it is required a proper time-stamp analysis of perishable speed resolutions.

3 MAS NEGOTIATION PROCESS

Aircraft and ATC will be considered intelligent agents within a Multi-Agent System for decision making, in which the number of aircraft starts with the elemental case of a pair-wise conflict, but without being bounded as the number of aircraft will depend on the traffic configuration and the considered complexity for establishing the ecosystem membership.

The **Ecosystem tracking (ET)** and **resolution** is performed collaboratively by the ATC and involved A/Cs, although ATC is always considered the main separator. **ATC ground tools** conduct the synchronization and updating of trajectories, the **evaluation** of the ecosystem state and the **generation of potential resolution** trajectories by exhaustive analysis of the state space for all ecosystem members as well. On the other hand, A/Cs will negotiate to find a commonly agreed conflict-free solution for all members while the ATC will monitor the negotiation evolution to be ready for a potential deadlock. In case the negotiation reaches the deadlock state or the evolution of the members is compromising the safety of the operations, ATC will impose a safe solution for all A/Cs. In Figure 1 it is represented the flow diagram only for the negotiation process between agents.

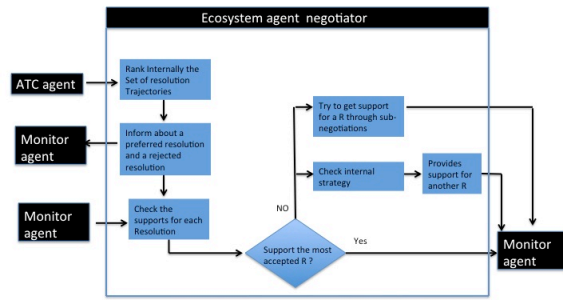


Figure 1: Flow Diagram for the agent negotiation process

In that diagram, the decision about when a consensus is reached or the ATC must issue a compulsory resolution trajectories is not represented since it is considered that is not part of the communication mechanism between agents, instead is a boundary condition that will allow the monitor agent (MnA) to stop the negotiation loop. As it can be observed, the business model of the AU and the negotiation strategy of each agent is a hidden information, the 2 key shared data between agents during negotiation are:

1. Preferred Resolution: The negotiator agent represents a particular aircraft that belongs to the ecosystem and knows the business model of the company. Thus, he can easily rank all the conflict resolution combinations generated by the ATC using the state space analysis tool considering AU preferences. As a result of this internal ranking and the information provided about the acceptability of the different resolutions by the other agents, it advert a particular resolution that would receive his support.
2. Rejected Resolution: Among the different resolutions provided by the ATC agent, the negotiator agent has the capacity to block one resolution since according to the business model of the company this resolution could affect negatively its preferences. This information is used by the rest of agents to relax its preferences in order to find a consensus before a compulsory resolution is issued by the ATC.

Among the feasible combinations of resolutions that are provided by the ATC agent, the deadline for the negotiation could be (or not) provided in order to force a consensus in a short time and avoid the ATC intervention. Note, that different negotiation policies could be supported by means of this flow diagram. For instance, if the deadline for the negotiation loop is provided to the agents at the first negotiation loop,

some agents could take the advantage to delay a consensus to force a resolution that could provide better benefits. On the other way around, the lack of the deadline for the negotiation, could also help to reach a consensus under “the sooner the better” policy. This former option could work if all the ecosystem member belongs to the same company.

To summarise, the flow diagram and its ontology has been elaborated to support different negotiation policies preserving this information that AU’s wouldn’t never share, but providing the possibility to reach a consensus among the ecosystem members while at the same time provides enough information to predict if the negotiation is moving towards a consensus or is reaching a negotiation trap that circle around the same arguments.

4 MAS NEGOTIATION DEADLOCK

Among the different factors that can lead to the stagnation of negotiation processes in the resolution of an ecosystem, the most relevant ones that should be considered during the design of the negotiation ontology are:

- Non-cooperation due to different jargon: The agents designed by OD end-users to test different CR policies should preserve the ontology described in this deliverable.
- Exclusion of some actors in the interaction process: During the Ecosystem Creation function all the cluster members that are willing to be members of the ecosystem and fulfil the equipment requirements to be members of an ecosystem (FUN-CEC-001). To avoid a trap due to a non-cooperative aircraft, the state space will generate only feasible resolutions for those aircraft involved in the negotiation process.
- Conflicting interests and values: At global level, the fierce competition between airlines to block preferred slots and trajectories could lead to a negotiation trap, however, at ecosystem level (i.e. local context), in which a compulsory resolution would be issued by the ATC in which AU’s preferences will not be considered, is a positive influence factor to enhance AU’s to reach an agreement supporting a balanced trade-off among the different performance interests.

To avoid poor results due to negotiation deadlocks between ecosystem members, an external actor is

considered in the ontology that represents the ATC with the capacity to interrupt the negotiation process at any time and issue a non-agreed resolution trajectory to some or all the ecosystem members.

Despite the ontology will support the influence of ATC preferences as an external actor during the negotiation process, this capacity does not mean that the external actor is always involved in the resolution process. It is expected that the Open Demonstrator will provide new results about the ecosystem characteristics that usually requires the intervention of the ATC as external actor when the AU's actors who are involved in the deadlock are close to reach a resolution agreement but finally the external actor is necessary to overcome small difficulties

The level of performance that can be achieved in the resolution of ecosystem conflicts is the result of interactions between many entities at different levels. The roles of these various entities must be properly identified considering those agents that just react to the environment with respect to those agents with choice capacity which usually will embed different algorithms to act on the environment trying to reach their goals in an efficient and safe way.

For simplicity only 2 aircraft are considered in the negotiation loop. The steps in the negotiation are:

1. Initially, the ATC Agent sends a Request-Response message (RR_Activate) to each aircraft of the ecosystem to validate its willingness to participate in the negotiation process to reach a resolution consensus. The ATC agent remains waiting until a response (SM_Active) from each aircraft is received.
2. Once the ATC have the confirmation of the aircraft that belongs to the ecosystem, it computes the combination of feasible resolutions by means of the state space analysis and sends a message (SM_Resolutions) with the resolutions to the aircraft agents and the monitor agent. Note, that the set of feasible resolutions cannot be computed until the cluster aircraft have confirmed they accept to become ecosystem members.
3. Each Aircraft Agent updates its variables states and shares this information through a Start_Transaction message (ST_StateVar) to its negotiator agents who holds the business model to constantly update the state variables of the aircraft together with the costs of some manoeuvres identified by the agent negotiator. The flow of information is finalized by an End_Transaction message (ET_StateVar) sent by the negotiator agent.
4. Once the negotiator agent has identified the best and the no-go resolution trajectory, it informs the monitor agent by means of a message (SM_Resolution) about the preferred resolution trajectory and the no-go trajectory.
5. Since this synchronization mechanism is an event-oriented mechanism, the monitor agent will wait until all negotiator agents have sent the SM_Resolution message, to crosscheck if there is any resolution consensus among the ecosystem members.
6. In case no consensus is reached, the monitor agent will send a message (SM_Inform) to all the negotiator agents with the most accepted resolutions and the no-go ones. In Figure 3 there are represented only 2 aircraft for simplicity purposes, but in an operational ecosystem the monitor could receive several preferred resolution trajectories and only those that received more support will be used in the SM_Inform message.

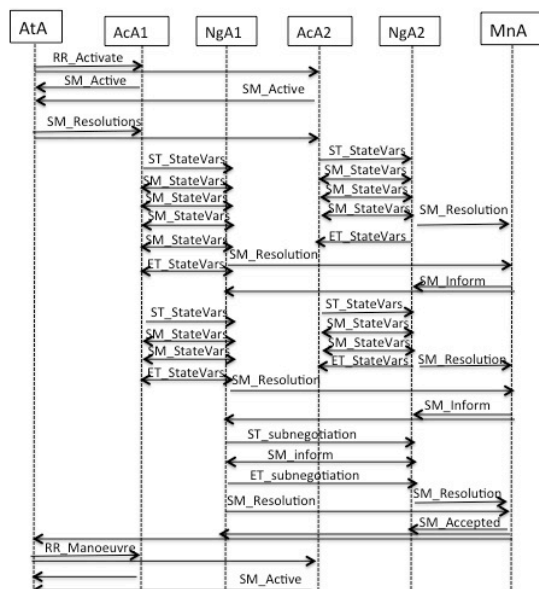


Figure 2: Resolution Consensus after 3 interactions

In Figure 2 it is represented graphically a negotiation process under an Event-oriented policy, in which a resolution consensus is achieved after 3 interactions: the first 2 interactions are supported by negotiator agents providing their preferred and no-go resolution while the third interaction is through a direct sub-negotiation process between negotiators agents.

7. In case a consensus is reached, the monitor agent will send a message (SM_Accept) to all the negotiator agents and the ATC agent providing the consensus reached (i.e. resolution trajectories to be implemented by the aircraft).
8. Once the ATC agent has been informed that a resolution consensus has been reached, it validates the manoeuvres and informs each aircraft agent by means of a Request Response message (RR_Manoevre) to implement the manoeuvre.

The negotiation loop is finalized once the ATC agent receives from each aircraft agent a message (SM_Confirm) confirming that the resolution will be performed.

5 RESOLUTION DEADLOCK DYNAMICS AND SIMULATION RESULTS

In the considered scenarios, some assumptions are made. Firstly, the aircraft trajectories during the existence of the ecosystem are linear segments. Secondly the maneuver space is discretized in space and time, which means aircraft can perform maneuvers with a certain deviation angle from the original trajectory and these maneuvers can be performed only at discrete time instances. The maximum angle deviation is assumed to be 30° and the increment 5° . The time increment is taken 1 second (see figure 3).

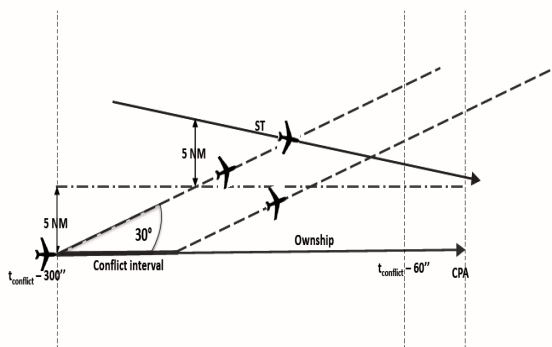


Figure 3: Possible resolutions to be flown by an aircraft

Lastly the possible taken maneuvers should be synchronous, i.e. all the performed maneuvers that will be taken to resolve the conflict should be taken at the same time from all aircraft members.

The ecosystem trajectories are graphically presented in a 3D Euclidean space, with latitude and longitude measured in [km] and altitude in [ft]. The results

show the cumulative number of the feasible trajectories over the ecosystem time

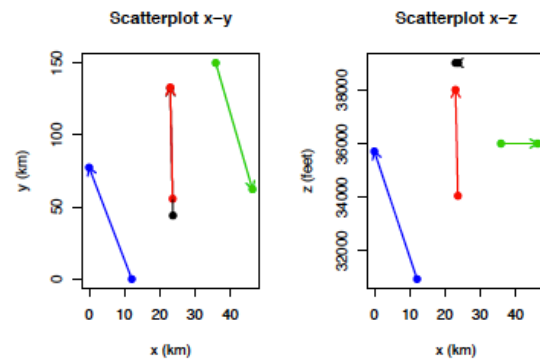


Figure 4: Ecosystem scenario-1

As can be seen from Figure 4, ecosystem 1 is composed of three aircraft in an evolving encounter. It is easy to note in figure 5, that early seconds during the negotiation process is critical to reach a good resolution consensus between ecosystem aircraft. During the first 40 seconds of the negotiation process, the amount of feasible resolutions drops to half of the original set of negotiable resolutions. This characteristic do not depend only on the amount of the aircraft that belongs to the ecosystem, but also to the trajectory configurations.

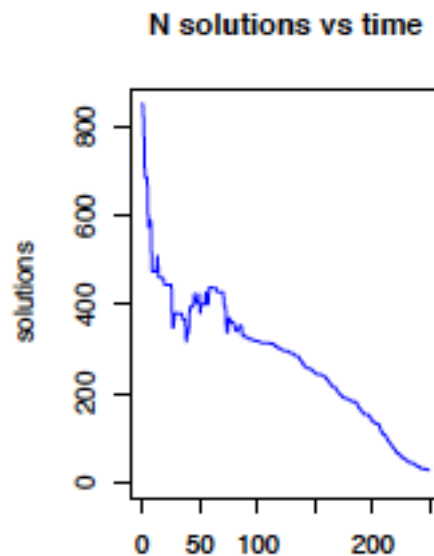


Figure 5: Feasible conflict resolutions in scenario 1

In figure 6, another ecosystem with 5 aircraft is represented.

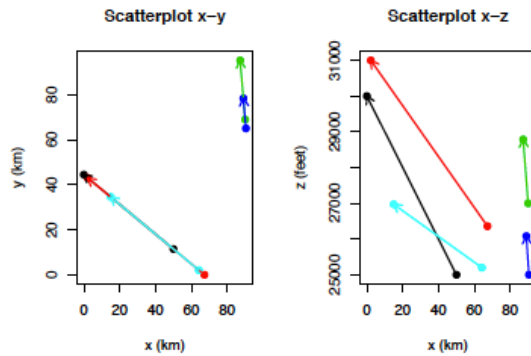


Figure 6 Ecosystem scenario 2

The amount of feasible resolutions is represented in figure 7. As it can be noted, the amount of feasible resolutions increments after 40 seconds since one of the threads in the surrounding traffic leaves the ecosystem.

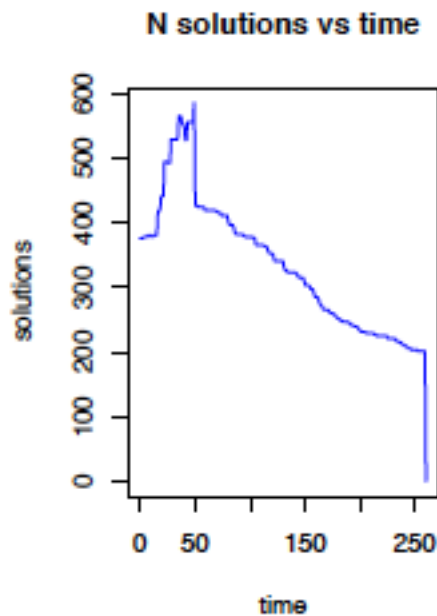


Figure 7: Feasible conflict resolutions in scenario 2

6 CONCLUSIONS

This study illustrates the importance of a quantitative analysis of the potential resolution for a given pairwise aircraft conflict considering the surrounding traffic. The speed of perishable resolutions is a critical factor to implement MAS models to support an efficient negotiation process in which the airspace users could take an active role considering hidden business models.

Acknowledgements

This research is partially supported by the EU Horizon 2020 Research and Innovation Programme, Project “ Adaptive self-Governed aerial Ecosystem by Negotiated Traffic (under Grant Agreement No. 699313)” and Ministry of Economy and Competitiveness. Project “Fire Guided Unmanned Aircrafts and Resources Distribution (TIN2014-56919-C3-1-R). Opinions expressed in this paper reflect the authors’ views only..

References

- [1] AGENT Project Team, 2016. Report on AGENT functional and non-functional requirements. Ref. 2015 (699313), Cranfield, United Kingdom.
- [2] Bouarfa, S., Blom, H. A., Curran, R. and Everdij, M. H., 2013. Agent-based modeling and simulation of emergent behavior in air transportation. *Complex Adaptive Systems Modeling*, 1(1), 15.
- [3] Enea, G. and Porretta, M., 2012. A comparison of 4D-trajectory operations envisioned for Nextgen and SESAR, some preliminary findings. In: 28th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, pp. 23-28, Sept, 2012.
- [4] Kochenderfer M. J., Holland, J. E. and Chrysanthacopoulos J. P., 2012. Next generation airborne collision avoidance system. *Lincoln Laboratory Journal*, 19 (1), 17-33.
- [5] Murugan, S. and Oblah A. A., 2010. TCAS Functioning and Enhancements. *International Journal of Computer Applications*, 1 (8), 46-50.
- [6] Radanovic, M., Piera, M.A., Koca, Th., Saez, F.J., 2017. Airborne Ecosystem Complexity Analysis for Tactical Conflict Management. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*,
- [7] Ramasamy, S., Sabatini, R., Gardi, A. and Kistan, T., 2014. Next generation flight management system for real-time trajectory based operations. *Applied Mechanics and Materials*, 629, 344-349.
- [8] Tang, J., Piera, M. A., Ling, Y. and Fan, L., 2015. Extended traffic alert information to improve TCAS performance by means of causal models. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015. Pedrycz, W., (1993) Fuzzy sets and fuzzy systems, Research Studies Press, England

ONLINE DECISION SUPPORT FOR AN EVAPORATION NETWORK

José Luis Pitarch, Carlos Gómez Palacín, César de Prada

Systems Engineering and Automatic Control Department, EII, Universidad de Valladolid.
C/ Real de Burgos s/n, 47011, Valladolid. {jose.pitarch | carlos.gomez | prada}@autom.uva.es

Marc Kalliski

Department of Biochemical and Chemical Engineering, Technische Universität Dortmund.
Emil-Figge-Str. 70, 44227, Dortmund Germany. Marc.Kalliski@bci.tu-dortmund.de

Christian Jasch

Lenzing Aktiengesellschaft, Werkstraße 2, 4860 Lenzing, Austria. c.jasch@lenzing.com

Abstract

This work presents a decision-support tool to address the model-based optimization approach for online load allocation and scheduling of cleaning operations in an evaporation network. The aim is improving the resource efficiency by supplying the optimal solution for a given production goal. The approach includes the semi-automatic update of evaporator models, which is based on historical data for minimal modelling effort. The structure of the problem is formulated via mixed-integer programming and integrated into the plant supervision systems. Production constraints, concerns about the practical implementation and visualization preferences are also taken into account in the design of the prototypical tool.

Key Words: integration, decision support, visualization, surrogate model, evaporation network, resource efficiency.

1 INTRODUCTION

The fast changes in global market conditions and increasing environmental constraints force the process industry to continuously adapt their operation to keep competitiveness. In this way, an agile plant-wise optimization of continuous and discrete decisions is required to operate as efficient as possible while fitting the new conditions [1].

To face these emerging challenges, plant managers and operators need to be provided with computer-based tools which guide them to balance production and resource consumption [2]. Special attention to the efficient development of plant models needs to be paid, as it is the basis for advanced control and coordination tasks. Moreover, there exist many coding languages and alternatives to implement optimization algorithms into software modules but, in the end, these tools must be integrated into the information technology (IT) infrastructure of the plants, e.g., via a neutral deployment platform that connects to different IT systems [3].

This paper deals with these issues in the evaporation network of Lenzing AG, a viscose fiber production factory located in Austria. A description of the approach and a prototypical tool for the optimization of the allocation of evaporators to products is presented, with the goal of minimizing the overall specific steam consumption (SSC).

In addition, evaporation plants suffer from performance degradation due to fouling inside the heat exchangers. Hence, maintenance tasks become necessary to recover efficiency, but they involve a cost. Therefore, a suitable scheduling of such cleaning tasks over time for each evaporator arises as an additional problem to the load allocation optimization. This requires the resolution of an economic optimization involving discrete and continuous values.

Our approach considers data driven plant models, able to be updated in a semi-automatic way, and efficient mixed-integer nonlinear programming (MINLP) software to solve the proposed optimizations online. The different optimizations were programmed as modules using MATLAB® and MS Excel®, and then linked to the PI System in the plant.

The paper organizes as follows. Next, a description of the application, system limitations and assumptions are given. The modelling routine is summarized in Section 3. Then, the optimization of the load allocation and the cleaning schedule is formally stated in Section 4. The interfaces design together with the system integration is presented in Section 5. Finally, a summary of the work together with indications for the next steps is given in the last section.

2 APPLICATION CASE

The production of viscose fibers is based on the renewable resource wood. The cellulose contained in the wood is chemically treated and converted to a viscose solution. The key production step is the regeneration of this solution into fibers, introduced in an acid bath. Apart from the solid fibers, this chemi-

cal treatment produces sodium sulfate (Na_2SO_4) and water as side products. This degrades the acid bath and, in consequence, the product quality. Therefore, it is necessary to constantly remove water and sodium sulfate from the bath. A network of multiple-effect evaporation plants linked to a crystallization section is used for such a task.

Figure 1 depicts a simplified schema of an evaporation plant, where the main manipulated variables are the recirculation flow F and the product temperature T after the heat exchangers. For a more detailed view of the plant the reader is referred to [4].

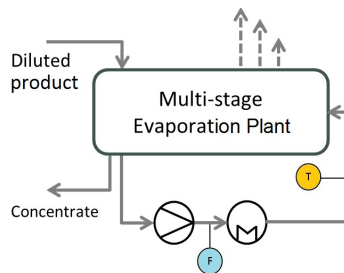


Figure 1. Simplified schema of an evaporation plant with the important control variables F and T .

2.1 NETWORK DESCRIPTION

The evaporation network comprises a total of 23 plants of different nominal capacities. This network needs to process 5 different products, so some plants can serve in more than one product, but only a single product at a time. The changeover from one product to another gets a cost and requires time.

There are several factors which affect the efficiency:

- **Plant type:** [a] Compact with small capacity, [b] 3-stage evaporators and [c] large evaporators.
- **External influences:** Ambient temperature and air humidity affect the cooling towers.
- **Fouling:** Bath impurities settle within the heat exchangers, reducing the heat transfer.
- **Operating point:** For a desired evaporation set point, the control values are not uniquely defined

The resource efficiency indicator (REI) [2] chosen for this process is the SSC, defined for each plant as the ratio of fresh steam consumed per amount of water removed from the product. The task for the plant personnel is to find an optimal allocation of plants to products that ensures the required evaporation rate per product with the lowest SSC. This optimal operation can only be achieved by considering all these significant influences on the resource efficiency in the optimization of the evaporation network. However, the size of the combinatorial problem and the amount of influence factors make the problem very challenging. Indeed, model-based op-

timization approaches have already improved the efficiency in the operation of an evaporation plant [4], and we still foresee more potential savings in a better coordination of the whole network.

Therefore, computer-aided decision support (DS) tools need to be provided to help operators in this task, so suitable models need to be developed. Furthermore, a suitable computational time is required to provide results in acceptable time, to avoid production delays, and to ensure operator acceptance.

2.2 PLANT MODELS

The evaporator set-up is similar for all plants, but varies in the number of stages and production capacities. The amount of evaporated water depends on the circulating flow F , the product temperature T , and cooling water temperature T_{MK} which, in turn, is limited by the outdoor temperature. A mapping of the evaporation flow achieved for different values in the manipulated variables can be recorded (Figure 2).

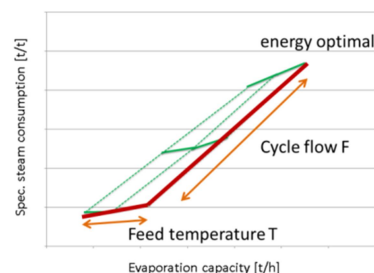


Figure 2. Specific steam consumption VS evaporation set point, obtained for different control values.

Extensive experimental tests shown that the effects of T and F on the SSC, as well as on the evaporation flow, can be described by linear relationships. Additionally, it was observed that the mapping in Figure 2 is shifted in a linear fashion with T_{MK} and the fouling state. Hence, two linear models were proposed to describe the plant behavior, one for the evaporation flow (EF) and another for the SSC, as linear functions of the inputs T, F, T_{MK} and the fouling state K_f (to be estimated):

$$EF = [a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad b_0] \cdot \begin{bmatrix} T \\ F \\ T_{MK} \\ 1 \end{bmatrix} + K_{f1} \quad (1)$$

$$SSC = [c_1 \quad c_2 \quad c_3 \quad d_0] \cdot \begin{bmatrix} T \\ F \\ T_{MK} \\ 1 \end{bmatrix} + K_{f2} \quad (2)$$

Where $\theta = \{a_i, b_0, c_i, d_0\}$ are constant parameters for offline regression and K_{fi} are time dependent ones to be identified online. The absolute steam consumption (ASC) for a plant is computed by multiplication of (1) and (2):

$$ASC = EF \cdot SCC \quad (3)$$

In this way, given a fouling state K_{f1} and a cooling water temperature T_{MK} , the maximum and minimum evaporation capacities, denoted by \overline{EC} and \underline{EC} respectively, for each plant can be computed by (1) with the acceptable operating ranges for F and T :

$$\begin{aligned} \overline{EC} &= EF(\overline{T}, \overline{F}, T_{MK}, K_{f1}) \\ \underline{EC} &= EF(\underline{T}, \underline{F}, T_{MK}, K_{f1}) \end{aligned} \quad (4)$$

The goal for the selection of the operating point is minimal specific steam consumption fulfilling the evaporation demand (red front in Figure 2). A self-optimizing controller (SOC) was implemented to ensure that operation always lies in this region. The controller maximizes the product temperature T to its upper limit and adjusts the circulating flow F to achieve the required evaporation flow [4]. Thanks to this optimal operation pattern, we are able to compute the control values corresponding to the red boundary in Figure 2 given a desired EF and an estimated state of fouling K_f : indeed note that the T is set to its upper bound and T_{MK} is set to the lower one achievable by the cooling tower, so F can be computed directly from (1) and, thus, the SSC from (2).

3 MODELLING ROUTINE

The model identification task is implemented in MATLAB and comprises a data treatment to remove inconsistent measurements, identifies step changes and performs an iterative fitting of the model parameters. The required data from the evaporators are obtained from the PI system via an OPC-connection and additional information such as the time window for identification, tag labels to the measurements in the historian, minimal number of changes in the EF, acceptable noise band in stationary operation, largest transition period during step change, or the time window for validation is provided by the operator with standardized Excel sheets. Finally, the quality of the model is assessed by a comparison of the model predictions with the measured EF and SSC.

3.1 DETECTION OF STEP CHANGES

For the modeling of the stationary part, the contribution of fouling must be removed from the training set. This is achieved during the model fitting process but requires data from operational points that are subject to the same degree of fouling. Thus, the tool identifies changes in the EF, because operation point varies enough to identify the parameters and we can assume that the fouling state does not vary significantly in one day.

In that way, the data is scanned for step changes as shown in Figure 3, providing intervals a and b . Step

changes are identified in the case that: data in a is at steady state (within a threshold); step change is larger than the threshold c and; the transition between the two steady states is completed within interval b . Each of the identified step is recorded and translated into a data pair by averaging the measured values before and after the change. Of course, enough changes provoked by T , F and T_{MK} are required for a reliable identification of the parameters in (1) and (2).

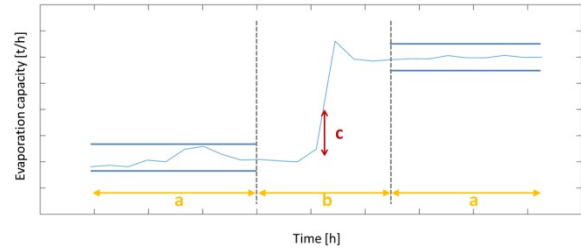


Figure 3. Stationary operation before and after the step (blue bounds), minimal step height (red arrow), maximal transition interval (dotted lines).

3.2 PARAMETER ESTIMATION

Based on the assumption that the fouling is different from step to step but remains constant during the step itself, parameters K_{f1} , K_{f2} can be estimated by comparison of the model predictions (\widehat{SSC} , \widehat{EC}) with the actual values (SSC , EF). The resulting fouling factor is subsequently used for both operating points that are considered (before and after step changes).

Hence, an iterative LS optimization over the overall data set arises, which first yields an intermediate set of steady-state parameters θ , used afterwards to calculate new values for K_{fi} , before solving an updated LS optimization to find the next model generation. These iterations continue until the residue J (objective function) does not improve any more.

$$J(\theta, u) = \sum_{i=1}^n \frac{(EF_i - \widehat{EF}_i)^2}{\sigma_{1i}} + \frac{(SSC_i - \widehat{SSC}_i)^2}{\sigma_{2i}} \quad (5)$$

Here u is the set of values of the manipulated variables T , F and T_{MK} , n is the number of identified step changes and σ_1 , σ_2 are normalizing factors. The identification procedure is summarized in Algorithm 1.

Algorithm 1. Parameter estimation for evaporation plants.

1. Provide an initial guess for θ and set $k = 0$.
2. Average the measured steady-state values for the SSC and EF before and after the step change.
3. Adjust fouling factors K_{fi} by comparing the SSC and EF from Step 2 with the model prediction.
4. Minimize (5) with θ as decision variables to find the best fit for all step changes.
5. If $J_k < J_{k-1}$ set $k = k + 1$ and go to Step 3, else the algorithm stops.

In practice, for a reasonable initial guess, the model parameters θ converge after a few iteration steps.

3.3 VALIDATION

The validation step in the modelling routine is performed to assess the quality of the model on the basis of an independent set of step changes that has also been obtained according to Section 3.1. For each identified step change, the fouling factor is also adjusted in the models to match the average values of recorded data before the load change. The model with the updated fouling factors is then used to simulate the plant for the same inputs applied during change. The resulting absolute error is then normalized with the height of the step change in the ASC, to yield a relative measure of the model error.

The observed relative errors are typically below 10%. These values were acceptable, since the network optimization is performed periodically and mis-modelling is reduced from run to run by an online estimation of the fouling state. In some cases relative errors of up to 30% have been observed due to a poor choice of load changes (e.g. non-stationary operation falsely identified as steady state). A manual selection of step changes, choosing an alternative modeling horizon, or an adjustment of the modeling settings was sufficient to improve the model fit.

4 NETWORK OPTIMIZATION

The objective is the minimization of the ASC for the entire network, given a desired evaporation demand. The overall ASC is calculated as the sum of (3) for all evaporators. Two main factors which affect the ASC are object of optimization: the load allocation and the cleaning policy.

4.1 OPTIMAL ALLOCATION

First, given a set of $p \in \mathcal{P}$ products to be processed in $e \in \mathcal{E}$ evaporation plants, the problem is to allocate plants to products and then distribute the required total demand per product SP_p in a way that the overall ASC in the network is minimized. Two sets of decision variables are defined for this aim:

- X_{ep} : Binary variables which link the product p to the plant e .
- EF_{ep} : Real variables defining the evaporation flow to be achieved in a plant e processing the product p .

Now, recalling (4), assuming that the fouling state K_f for each plant will be estimated, T_{MK} is measured and controlled, a set of maximum and minimum capacities for each plant $e \in \mathcal{E}$ is provided. Moreover, fol-

lowing the optimal control pattern explained in Section 2.2 of setting T for each plant to its upper limit \bar{T} , from (1)-(3) we get:

$$F_{ep} = \frac{EF_{ep} - a_1 \bar{T} - a_3 T_{MKe} - b_0 - K_{f1e}}{a_2} \quad (6)$$

$$ASC_{ep} = \frac{c_2}{a_2} EF_{ep}^2 + \left[\left(c_1 - \frac{a_1}{a_2} \right) \bar{T} + \left(c_3 - \frac{a_3}{a_2} \right) T_{MK} - \frac{b_0}{a_2} + d_0 - \frac{K_{f1e}}{a_2} + K_{f2e} \right] EF_{ep} \quad (7)$$

Thus, feeding this information, the optimal allocation of products to plants is found by solving the mixed integer quadratic programming problem below:

$$\min_{X_{ep}, EF_{ep}} J := \sum_{e \in \mathcal{E}} \sum_{p \in \mathcal{P}} ASC_{ep} \quad \text{s. t.:} \quad (8)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} X_{ep} \leq 1 \quad \forall e \in \mathcal{E} \quad (9)$$

$$\sum_{e \in \mathcal{E}} EF_{ep} \geq SP_p \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad (10)$$

$$EF_{ep} \leq \overline{EC}_e \cdot X_{ep} \quad \forall e \in \mathcal{E}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (11)$$

$$EF_{ep} \geq \underline{EC}_e \cdot X_{ep} \quad \forall e \in \mathcal{E}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (12)$$

$$X_{ep} = 0 \quad (e, p) \notin \mathcal{N} \quad (13)$$

Where X_{ep} is constrained in (12) to find feasible solutions within the set \mathcal{N} of allowed connections between plants and products.

4.2 CLEANING SCHEDULE

A complementary optimization is proposed to deal with the issue of fouling, which takes advantage of the already developed decision support: once optimal evaporation set points are computed for each plant, the idea is to suggest the next cleaning cycle by balancing the costs of operation over time with the cleaning costs in an optimal fashion.

This task requires models for the evolution of the fouling over time. Extensive experimental tests have been performed measuring the SSC in the evaporators running at reference operation points between consecutive cleaning cycles. This allows isolating the effect of fouling on the SSC increase, hence measurements are comparable. In this way, approximate linear evolutions of the fouling behavior could be identified by regression, see Figure 4.

Thus, the fouling contribution K_f in (1)-(2) becomes:

$$K_f(t) = K_{f0} + \alpha \cdot t \quad (14)$$

Where t stands for the time (in days) that a plant is in operation, K_{f0} is the initial or current estimation of

the fouling state, and α is the slope of the linear model. In this way, predictions of the future SSC (hence costs) can be computed given a desired EF .

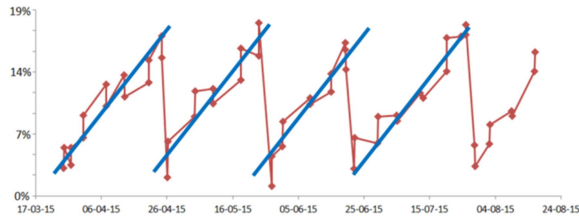


Figure 4. Measured evolution of the SSC (red) and output of the regression model (blue).

In order to lump resources of different nature (steam, manpower, cleaning products, etc.) in a single efficiency indicator, an aggregation based on currency is used. Hence, using prices and costs for utilities, the *Normalized Average Cost per Time* (NAC) is defined as an REI, and indicates the unitary cost (€/d) incurred to operate a plant between two consecutive cleaning tasks (operation cycle):

$$NAC := \left(\sum_{t=0}^{t_f} ASC(t) \cdot P_{Th} + \Delta t_{cl} \cdot P_{Manh} + WstWat \cdot P_{m^3} + \Delta t_{cl} \cdot ASC(t_f) \cdot 1.1P_{Th} \right) / t_f \quad (15)$$

Here t_f is the suggested future day to perform the cleaning operation, Δt_{cl} is the time required to complete a cleaning operation, and P_{Th} , P_{Manh} and P_{m^3} are the costs of the fresh steam, manpower and waste water. Note that, once the EF to each plant is set from (8)-(13), the $ASC(t)$ is computed via (7) and (14).

Note also that when an evaporator is stopped for cleaning, its load must be assumed by others, so an approximate cost factor of a 10% increase over the nominal operation cost is added in (15).

The NAC is to be minimized with respect to t_f for each evaporator to compute a periodic “individually optimal” cleaning policy, which attempts to be a “nearly optimal” one for the whole network. However an issue appears in using (15) as objective function: the cost of operation is a discrete sum which gets t_f terms, being t_f unknown a priori, as it is decision variable. To express this cost in a suitable way, we make use of the formula found by Gauss in the late 1700’s for this type of arithmetic series [2]:

$$\kappa \cdot (1 + 2 + 3 + \dots + T_f) = \kappa \cdot \frac{(1 + T_f) \cdot T_f}{2} \quad (16)$$

Moreover, there are two types of cleaning tasks, denoted by B (big) and S (small), reaching different recoveries K_{f0} , booking different times Δt_{cl} and using more or less waste water. Thus, each task will get different *fixed* costs in the NAC (15) so the optimizer must choose which option minimizes the costs.

Thus, the proposed economic optimization to predict the optimal cleaning policy for one plant reads:

$$\min_{t_f, c} J := c \cdot NAC|_B + (1 - c) \cdot NAC|_S \quad (17)$$

$$\text{s. t. :} \quad 0 \leq c \leq 1; \quad t_f > 0 \quad (18)$$

Here notation $NAC|_B$ stands for (15) evaluated with values Δt_{cl} , K_{f0} and $WstWat$ corresponding to a big cleaning operation ($NAC|_S$ is analogous for a small cleaning). Note that this optimization to choose between discrete alternatives can be handled via NLP because (17) is monotonous w.r.t. c , so its minimum is located in an extreme, either $c = 0$ or $c = 1$. In this way, the best cleaning (big or small) is chosen.

5 SYSTEM INTEGRATION

The modelling as well as the load allocation modules were implemented using MATLAB®. The cleaning schedule optimization was coded in directly in MS Excel. These choices are justified since the required licenses and experience of the engineering department at Lenzing AG are available for the sustainable maintenance of the decision-support solution.

Figure 5 depicts a schema of the real-time optimization (RTO) implemented to cope with the load allocation task, which is executed each 30 min. The user dashboard is included as a Process Book in the PI system. It shows the results and allows to manually trigger the optimization in case of significant changes in the evaporation SP_p . After the activation, the static information (network information, model parameters, etc) is read from an Excel interface. Production constraints change dynamically, so they are either directly supplied by the data historian or inferred from measurements. Then, an update of the fouling parameters K_{f1} and K_{f2} is performed and saved to a file. The fouling parameters of the inactive equipment are not updated in the file.

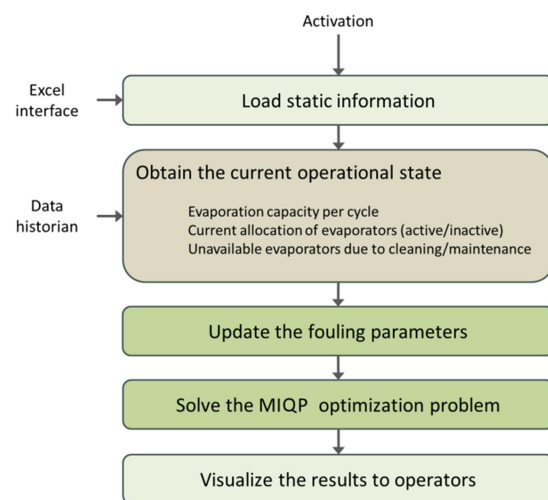


Figure 5. RTO concept for the evaporation network.

Execution of the optimization results in the allocations of evaporators to products, the load distribution,

the SSC and ASC for each plant. This information is written back to the system using special PI-Tags which are displayed to the operators via dashboard application in the PI Process Book. Hence, the operators should adjust the evaporator loads and allocations accordingly.

However, the optimization of the load distribution may sometimes result in infeasibility, since approximate models (1) might slightly underestimate the evaporation capacity for some plants. This situation might lead to optimization problems that are overall infeasible based on the model prediction, even though the real plant is capable to fulfil the desired evaporation flow.

5.1 HANDLING INFEASIBILITIES

It is impossible to provide reliable decision support to the operators without a feasible solution from the optimizer, because hard constraints might be violated. To avoid these situations, a feasibility check is performed first, that evaluates whether the currently measured evaporation flow for each evaporator can be achieved with the models under the same external constraints (weather, cooling water temperatures and network availability). Then, for the identified infeasible plants, the MIQP constraints (11) are softened with slack variables $S_e \in \mathbb{R}^+$ as follows:

$$EF_{ep} - S_e \leq \overline{EC}_e \cdot X_{ep} \quad \forall e \in \mathcal{S}, \forall p \in \mathcal{P} \quad (19)$$

Where \mathcal{S} is the set of plants which are identified infeasible after the feasibility check. Then, the sum over all slack variables is included as a penalty term into the objective function (8) as:

$$\min_{X_{ep}, EF_{ep}, S_e} J := \sum_{e \in \mathcal{E}} \sum_{p \in \mathcal{P}} ASC_{ep} + M \cdot \sum_{e \in \mathcal{S}} S_e \quad (20)$$

The weight M is roughly chosen to be greater than the largest possible value of (8), i.e., without the contribution of the slack variables. Thus, the solver will only provide the absolutely necessary amount of constraint violation. Note that the network operation will not result in constraint violations on the control inputs, since the SOC is in place for each plant, and infeasibility is only a result of a plant-model mismatch. Moreover, a warning can be passed to the supervisor (plant engineer). Thus, depending on the severity of the plant-model mismatch, corrective actions can be taken, e.g., a model update according to the procedure in Section 3.

The final optimization problem can be coded in MATLAB and solved with an MILP solver via successive linear approximations [7], or directly with a MINLP solver like BONMIN [8] via the open source OPTI-Toolbox, although this option might be less computationally efficient.

5.2 DECISION-SUPPORT INTERFACES

The visualization interface is adapted to the already existing concept that was designed to give an overview of the evaporation process during production. On the one hand, the operators are supplied with the dashboard depicted in Figure 6 that shows the computed optimal solution for the current time. The vertical columns represent the 23 plants in the network and the rows represent 5 products. Light grey boxes are the allocation possibilities of plants to products. If a plant is assigned to one of these possible combinations, the box becomes green. Plants that are currently assigned to a product but are not in operation (under maintenance or cleaning) are shown by red tiles.

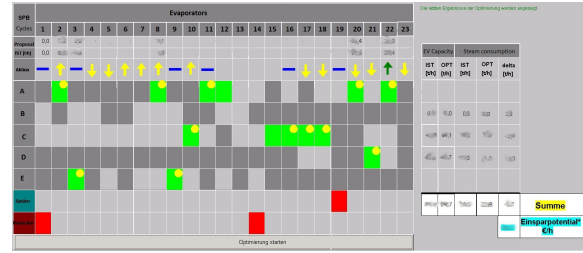


Figure 6. Interface of the prototypical tool for online optimization of the evaporation network.

The allocation plan according to the optimization results is indicated with yellow (partial load) or green circles (full load) at the corresponding position in the matrix representation. The optimal load distribution to plants is directly given next to the current value at the top of the matrix. Small pictograms show the necessary direction of the change in evaporation set points. On the right hand side, the current and optimal values for a total product evaporation flow and the ACS are listed. Finally, the predicted network-wide savings potential is shown in € saved per hour, in order to create an incentive for the operators to apply the predicted evaporation set points to plants.

On the other hand, the cleaning prediction module of Section 4.2 has been implemented by an Excel-based tool, partially coded in Visual Basic and using the OpenSolver [9] add-on, whose current version includes BONMIN as optimization engine. This tool complements the one above, by receiving the load allocation for each evaporator as input data.

The interface is formed by several sheets: one for each plant and a general overview of the network. In each plant sheet there is a set of values to be set: duration of cleaning tasks, costs of resources, energy prices, model parameters and control set points T, T_{MK} (see Figure 7). The tool provides a button in each sheet to trigger the optimization (17)-(18), displaying then when the evaporator should be cleaned and which type of operation is best, as well as the cost components and current value of the NAC for the suggested policy. Moreover, the tool serves also

as a simulator for what-if analysis, because the user is allowed to manually set the next cleaning day and the type of cleaning. In this way, the tool informs the operator about the potential losses in €/d incurred with respect to the optimally computed NAC, encouraging him/her to apply the suggestions.

Cleaning Prediction for Evaporator 38

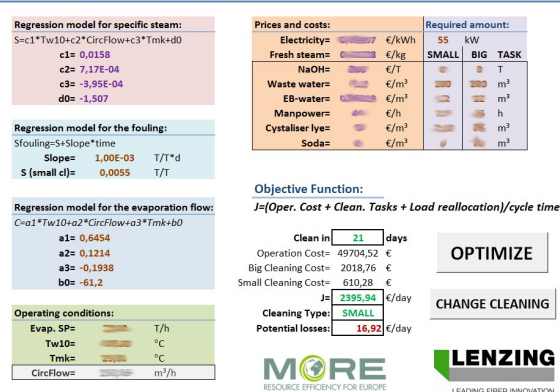


Figure 7. Interface of the prototypical tool for the improved scheduling of cleaning operations.

6 CONCLUSIONS & OUTLOOK

The modelling, optimization and visualization concepts presented in this paper support the operators to take better decisions in real time to improve the network operation. The modelling tool executes an automatized model update based on historical data and user inputs. The resulting models are incorporated in the RTO scheme that solves a MIQP problem according to the current production constraints and the plants fouling states. The results are visualized in the daily production environment, including predictions of the potential monetary savings, incentivizing thus the operators to apply the recommendations.

Models for long-term fouling effects were identified by extensive experimentation, to be then used in an economic optimization. The incorporation of such functionality allows finding the best cleaning policy for each plant. This provides additional benefits in terms of energy and costs associated to the cleaning.

The developed DS tools are currently under evaluation at Lenzing AG: the implementation into the existing systems and operational policies is performed step by step to get experience in live testing and to ensure acceptability from the plant personnel. About a year of normal operation is required to assess the impact, but preliminary tests with historical data revealed around 10% ASC potential savings.

Further improvements in the modelling approach are expected if different plant models are used for the summer and winter periods. If the impact assessment shows sufficient improvement, other heuristics and

decompositions of the optimization problems will be evaluated to take into account uncertainty in model parameters and/or external factors.

Acknowledgement

This research is funded by the European Union's Horizon 2020 program, under grant n° 723575, and by the MINECO/FEDER (DPI2015-70975-P).

References

- [1] S. Engell and I. Harjunkoski, "Optimal operation: Scheduling, advanced control and their integration," *Computers & Chemical Engineering*, pp. 121-133, 2012.
- [2] S. Krämer and S. Engell, Resource Efficiency of Processing Plants: Monitoring and Improvement, (In press): Wiley, 2017.
- [3] LeiKon, "D4.1 Requirement specification for the integrated deployment platform," Outcomes of the MORE Project, 2014.
- [4] J.L. Pitarch, C.G. Palacín, C. de Prada, B. Voglauser and G. Seyfriedsberger, «Optimisation of the Resource Efficiency in an Industrial Evaporation System,» *Journal of Process Control*, vol. 56, pp. 1-12, 2017.
- [5] M. Kalliski, B. Beisheim, D. Krahè, U. Enste, S. Krämer and S. Engell, "Real-time resource efficiency indicators," *atp edition - Autom. Praxis*, vol. 58, pp. 64-71, 2016.
- [6] D.M. Burton, *Elementary Number Theory*, Boston: MA: Allyn and Bacon, 1989, pp. 80-81.
- [7] C. Blik, P. Bonami and A. Lodi, "Solving Mixed Integer Quadratic Programming problems with IBM-CPLEX: a progress report," in *Proc. of the 26th RAMP Symposium*, Tokyo, 2014.
- [8] P. Bonami, L. T. Biegler, A. R. Conn, G. Cornuejols, I. E. Grossmann, C. D. Laird, J. Lee, A. Lodi, F. Margot and A. Waechter, «An Algorithmic Framework for Convex Mixed Integer Nonlinear Programs,» *Discrete Optimization*, vol. 5, n° 2, pp. 186-204, 2008.
- [9] A. Mason, "OpenSolver – An Open Source Add-in to Solve Linear and Integer Programmes," in *Operations Research Proceedings 2011*, D. Klatte, H. Lathi and K. Schmedders, Eds., Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 401-406, <http://opensolver.org>.

PREDICCIÓN DE LA IRRADIANCIA A PARTIR DE DATOS DE SATÉLITE MEDIANTE *DEEP LEARNING*

J. Pérez

Dep. de Ingeniería y Ciencia de los computadores, perezsolerj@gmail.com

J. Segarra-Tamarit, H. Beltran, C. Ariño, J.C. Alfonso-Gil, A. Attanasio, E. Pérez

Dep. de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño, Universitat Jaume I, Castelló de la Plana, España

Resumen

El conocimiento con antelación de la irradiancia solar en la superficie en una ubicación determinada presenta diversas utilidades para las plantas fotovoltaicas, como la participación más ventajosa en el mercado eléctrico o las menores necesidades de almacenamiento para ello. En este trabajo se estudian diferentes alternativas para la estimación de la irradiancia a posteriori y se propone una red neuronal artificial que, utilizando esta estimación, predice la irradiancia solar futura con una hora de antelación.

Palabras clave: Predicción, Irradiancia solar, redes neuronales, deep learning, MSGCPP, MACC-RAD

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento exponencial experimentado de forma prácticamente sostenida durante los últimos 10 años por el sector de la energía fotovoltaica le ha llevado a contar con más de 300 GW de potencia instalada a cierre del año 2016, y con una previsión de alcanzar cerca de 370 GW a finales de 2017[1]. Esto hace que a día de hoy la fotovoltaica sea la principal tecnología de producción de energía eléctrica a nivel de nuevas instalaciones a escala mundial[2].

La continua e imparable penetración de la fotovoltaica en los sistemas eléctricos de los distintos países implica un reto asociado a la estabilidad de estos sistemas [3] ya que, cabe recordar, la fotovoltaica es una tecnología cuya producción es inherentemente intermitente. Así, la estocástica evolución de las nubes a lo largo del día comporta que las plantas fotovoltaicas no puedan garantizar una producción determinada en cualquier momento del día. Esto ha venido dificultando tanto la gestión de la red por parte de los operadores como la participación de estas plantas en los mercados de compraventa de electricidad de los distintos países.

Por otro lado, la irrupción en el mercado eléctrico con unos precios cada vez más competitivos de

varias tecnologías de almacenamiento de energía, principalmente baterías de iones de litio y de sulfuro de sodio, ha abierto la puerta a la aparición de proyectos fotovoltaicos híbridos que incorporan baterías[4]. Estas nuevas plantas presentan curvas de producción mucho más controladas ya que las baterías ejercen el rol de buffer energético. Por tanto, las baterías permiten suplir las limitaciones de la fotovoltaica a nivel de predictibilidad pero siguen siendo un elemento caro que aumenta bastante el coste de la instalación, reduciendo su rentabilidad. Además, las distintas clases de batería presentan todavía vidas útiles asociadas al ciclado relativamente limitadas [5], [6], [7] y [8], cosa que implica la necesidad de sustituciones a lo largo de la vida de la planta.

La posibilidad de predecir la irradiancia disponible en una ubicación se antoja en este sentido un factor fundamental ya no solo para mejorar la posible venta de electricidad con mayor fiabilidad por parte de las plantas fotovoltaicas al mercado eléctrico, sino también para poder optimizar el funcionamiento de la planta incluyendo como parámetro de operación la minimización del envejecimiento de las baterías.

En este artículo se presenta una metodología que permite predecir con una hora de antelación cual será la irradiancia en una ubicación determinada con un error sistemático de 0.01 y una desviación típica de 0.18.

2. IRRADIANCIA A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE

Una de las metodologías más utilizadas para realizar estimaciones de irradiancia solar sobre la superficie terrestre se basa en el uso de imágenes de satélite, que a nivel europeo proceden del sistema de satélites Meteosat de segunda generación MSG. No obstante, existen varias plataformas o bases de datos que ofrecen distintos tipos de estimación, para las distintas ubicaciones y para cada momento específico, obtenidas mediante cálculos y algoritmos propios a partir de dichas imágenes de satélites. En este estudio se han utilizado y evaluado los datos producidos por dos de es-

tas plataformas: *MSGCPP* [9], desarrollada por el Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, y *MACC-RAD* [10], promovida por la Comisión Europea y que forma parte del programa para la observación de la tierra, Copernicus.

Por lo que respecta a *MSGCPP*, ésta utiliza para obtener la irradiancia un algoritmo basado en las propiedades físicas de las nubes identificadas en las imágenes de satélite. De este modo, permite descargar datos de diferentes parámetros (tales como temperatura y altura de las nubes, precipitaciones o radiación horizontal) estimados con un periodo de muestreo de 15 minutos y una resolución espacial de $3 \times 3 \text{ km}^2$.

En cambio, dentro de los múltiples datos relativos a diferentes parámetros relacionados con el clima que Copernicus pone a disposición de los usuarios, el servicio de *MACC-RAD* proporciona series de datos de radiación horizontal en cualquier lugar de Europa con un periodo de muestreo de hasta un minuto. Los datos se calculan interpolando para la posición solicitada y los valores disponibles más recientes son de dos días antes de la fecha actual.

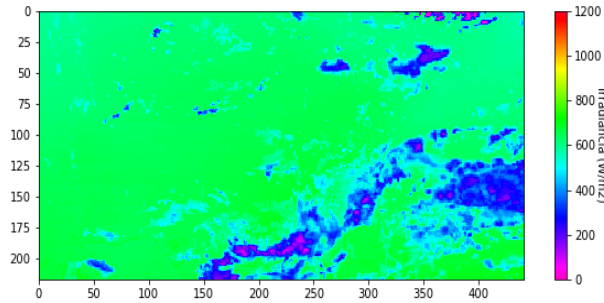


Figura 1: Mapa de irradiancias a partir de *MSGCPP*

Gracias a los valores de irradiancia proporcionados por estos modelos, se puede formar una matriz que represente la irradiancia de una zona como la representada en la figura 1. De este modo, más allá de la información relativa al punto de estudio se pueden conocer valores de irradiancia en zonas aledañas y, si se toma una sucesión de imágenes, se puede observar la evolución de las zonas de baja irradiancia causadas por las nubes.

3. COMPARACIÓN MSGCPP vs MACC-RAD

Las bases de datos introducidas ofrecen estimaciones de los valores de irradiancia puntuales y discretos que deben ser contrastados en todo caso con medidas reales para valorar su fiabilidad y utilidad. En [11] los autores estudian el error existente entre varios de los métodos de cálculo

disponibles en Europa y concluyen que el error cuadrático medio (*RMSE*) puede estar entre un 3% y un 6% cuando se agrupan los valores de manera mensual. Sin embargo, este error aumenta al reducir el periodo de los datos a nivel horario o diario.

Por lo que respecta a las bases de datos consideradas, la figura 2 muestra los valores de estimaciones realizadas para varios días consecutivos del año 2016. Se puede apreciar como ambos modelos son capaces de detectar la presencia de nubes y ofrecen valores de irradiancia similares a los reales. También se comprueba como para las primeras y últimas horas del día, *MSGCPP* no ofrece valores (debido a la inexistencia de imágenes de satélite). Sin embargo este modelo se aproxima más a los valores reales.

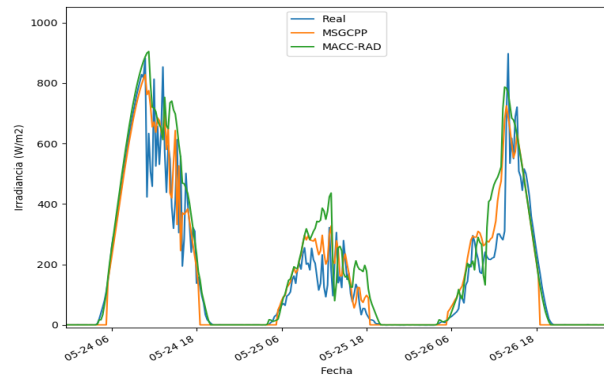


Figura 2: Comparación de datos para tres días

Se ha calculado con una frecuencia mensual el error entre los dos modelos y los valores reales. Esto se ha hecho como en [11], separando el *RMSE* en una componente sistemática (*Bias*) y una desviación estándar (*SDE*) de acuerdo a la ecuación 1.

$$RMSE^2 = SDE^2 + Bias^2 \quad (1)$$

El *RMSE* normalizado se calcula a partir de las medidas de irradiancia real (G_{real}) y de la irradiancia estimada (G_{est}), que se quiere analizar, utilizando la ecuación 2

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (G_{est} - G_{real})^2}{N \cdot \overline{G_{real}}^2}} \quad (2)$$

donde N es el número de muestras y $\overline{G_{real}}$ es el valor medio de irradiancia real. Por otra parte, el *Bias* normalizado se calcula utilizando la ecuación 3

$$Bias = \frac{1}{N} \sum \left(\frac{G_{est} - G_{real}}{\overline{G_{real}}} \right) \quad (3)$$

El resultado del error obtenido entre cada uno de los modelos y la realidad para 16 meses consecutivos, entre enero de 2016 y abril de 2017, se muestra en la figura 3. Se comprueba cómo el error mensual de *MSGCPP* es menor, ya que sus puntos están más próximos al 0 tanto en desviación estándar como en desviación sistemática.

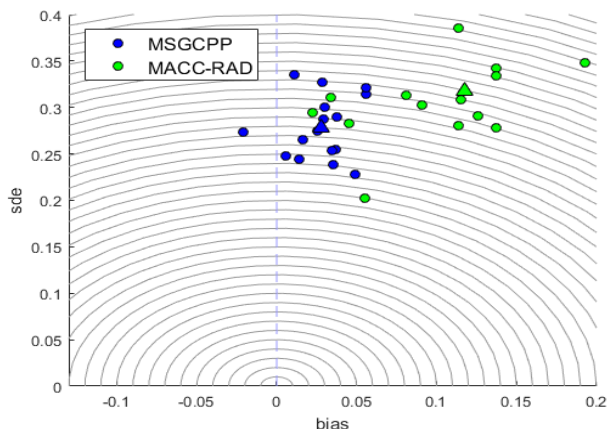


Figura 3: Representación de los errores mensuales de *MSGCPP* y *MACC-RAD*

4. PREDICCIÓN DE IRRADIANCIA MEDIANTE *DEEP LEARNING*

El campo de las redes neuronales artificiales, y más concretamente el conocido como *Deep learning*, presentado en [12], está revolucionando muchos campos de investigación que se encontraban estancados obteniendo resultados muy por encima del estado del arte hasta el momento. Esto es especialmente cierto en el campo de reconocimiento de imágenes, donde las redes neuronales se han mostrado muy efectivas como en [13], pero también en otros campos de aplicación tan diversos como el descubrimiento de partículas físicas [14] o nuevos medicamentos farmacéuticos [15].

Aunque la mayor parte de la teoría existente detrás de las redes neuronales se conoce desde hace tiempo, no ha sido posible explotar el máximo de sus posibilidades hasta contar con suficiente capacidad de proceso mediante el uso de unidades de procesamiento gráfico (GPU). Esto, unido a la gran disponibilidad de datos para procesar y directamente influir en la toma de decisiones, conocido como *Big data* y detallado en [16], ha producido que en los últimos años se vuelva la vista atrás hacia las redes neuronales artificiales.

El *deep learning* es una tecnología de aprendizaje automático, basado en las redes neuronales artificiales, que permite apilar capas simples que apli-

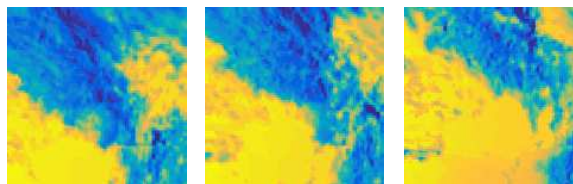


Figura 4: Evolución horaria de los datos de irradiancia en las imágenes por satélite.

can transformaciones no lineales a los datos de entrada al problema. Utilizando esta composición de transformaciones es posible aprender funciones muy complejas de los datos y obtener una representación más abstracta de los mismos.

Dicho de otra forma, las técnicas de *deep learning* aprenden a resolver problemas muy complejos generalizando a partir de ejemplos proporcionados a la red neuronal utilizando optimizadores generalmente basados en las técnicas de *gradiente descendiente* y *backpropagation*. Es por esto que resulta necesario diseñar una estructura de la red neuronal capaz de modelar adecuadamente el problema, cuyos parámetros se ajustarán teniendo en cuenta una función a minimizar para los datos de entrenamiento que se introduzcan. Esto es un proceso iterativo que normalmente requiere de horas, días, e incluso semanas de entrenamiento dependiendo de la complejidad del problema, hasta alcanzar un estado que permita resolver el problema para nuevas instancias de manera solvente.

En este trabajo se presenta el uso de *Deep learning* para predecir cuál será la irradiancia en una ubicación determinada con una hora de antelación a partir de una entrada de imágenes de satélite y de la irradiancia esperada fuera de la atmósfera para dicha ubicación en ese momento.

4.1. DATOS DE ENTRADA

Tal y como se ha comentado previamente, existen varios servicios capaces de calcular la irradiancia en cualquier ubicación y momento a partir de imágenes de satélite. Además, utilizando una serie de imágenes consecutivas centradas en un mismo punto, puede inferirse el movimiento de las nubes y, por tanto, sería posible predecir su próximo estado como puede verse en la figura 4.

Teniendo en cuenta esto, y la gran capacidad de las redes neuronales a la hora de procesar imágenes y extraer características de las mismas, la principal entrada a la red neuronal será la serie de imágenes inmediatamente anteriores al momento de predicción. Dada su mayor disponibilidad y precisión tal y como se demuestra en la sección 3, los datos utilizados son los de *MSGCPP*.

Aunque estos datos contienen mucha información sobre la evolución de las nubes en los alrededores de la zona de interés, carecen de información de la salida esperada en una situación ideal. Por ello, además de la entrada de satélite se incluye la curva de irradiancia esperada según la hora y fecha. Este es un valor que puede calcularse geométricamente a partir de estos datos y sirve para guiar la predicción que deberá ser ajustada por la red neuronal teniendo en cuenta la situación actual de la atmósfera.

Ambas entradas han sido ajustadas y sincronizadas para asegurar que los datos de entrada son correctos y la red neuronal es capaz por tanto de predecir datos futuros. Para entrenar la red neuronal se han utilizado datos de irradiancia centrados en la Universitat Jaume I y se ha tratado de predecir el dato de irradiancia proporcionado por el mismo satélite con una hora de antelación. El conjunto de datos se ha dividido en tres subconjuntos:

- **Entrenamiento:** Datos correspondientes al año 2016 utilizados para entrenar la red neuronal y obtener un modelo capaz de predecir la irradiancia. En cada iteración los datos son mezclados y reintroducidos, de forma que la red no aprenda estructuras artificiales creadas por la secuencia de datos inicial.
- **Test:** Datos del mes de agosto de 2015 para detectar posibles sobreentrenamientos. Estos datos se evalúan a intervalos regulares durante el entrenamiento y, si el error de este conjunto crece sostenidamente, esto supone un indicador de que el modelo de la red neuronal está aprendiendo detalles del conjunto de entrenamiento que no sirven para un modelo general.
- **Validación:** Datos del año 2015 para medir el error de predicción del modelo ya entrenado.

4.2. ESTRUCTURA DE LA RED

Para el entrenamiento de la red neuronal se han considerado diferentes arquitecturas capaces de resolver el sistema. Finalmente, la red propuesta se compone de capas convolucionales para la extracción de características en las imágenes y capas densamente conectadas que procesan estas características hasta obtener una predicción de irradiancia.

Las capas convolucionales realizan operaciones en la imagen afectando únicamente a píxeles cercanos al procesado de manera invariante a la posición. De esta forma, es posible detectar formas u objetos independientemente de su posición. Esto permite

extraer características de las nubes en diferentes imágenes y predecir su evolución.

Por otra parte, las capas densamente conectadas permiten hacer un análisis más global de la situación e inferir un resultado a partir del mismo. No obstante, este tipo de capas son más susceptibles a sobreentrenarse aprendiendo detalles del conjunto de entrenamiento que no son útiles para nuevas instancias del problema. Por tanto, su número de neuronas se ha mantenido bajo para evitar este tipo de situaciones.

Como función a minimizar se ha utilizado el error cuadrático medio (MSE), siendo una medida que indica la diferencia entre la predicción realizada y la esperada. Sin embargo, como medida de evaluación se ha utilizado el RMSE separado en las dos componentes ya definidas en (1). Esta medida permite mostrar de una forma más visual el error pero no aporta más información a la hora de entrenar y es más compleja computacionalmente.

5. RESULTADOS

Los resultados obtenidos con la red neuronal han sido comparados con dos modelos de predicción sencillos que se encuentran comúnmente en la bibliografía: modelo persistente, usado en [17] y [18], y modelo de coeficiente de nubosidad, usado en [19] y [20].

El modelo persistente asume que las condiciones climatológicas en el último instante disponible se mantienen para el instante de predicción. Por tanto, utilizando un modelo de cielo despejado se calcula la proporción respecto a la última medición y se aplica este mismo coeficiente para el instante de predicción. De esta forma, en días en que las condiciones no varían demasiado, la predicción es bastante precisa.

Por otra parte, el modelo de coeficiente de nubosidad asume que una única medida para calcular el coeficiente a aplicar en el instante de predicción está sujeta a ruido y variaciones rápidas. Por tanto, hace la media de las últimas medidas disponibles filtrando el posible ruido.

Ninguno de estos dos modelos es perfecto ya que fallan en días nublados y, por tanto, de condiciones cambiantes. Sin embargo, en un clima mayoritariamente soleado como el propuesto, producen resultados razonablemente buenos y son de este modo buenos modelos con los que compararse.

Aunque las predicciones pueden compararse directamente como en la figura 5, es difícil apreciar diferencias entre los métodos propuestos. En esta figura se muestran tres días, uno soleado y dos parcialmente nublados, y los diferentes métodos

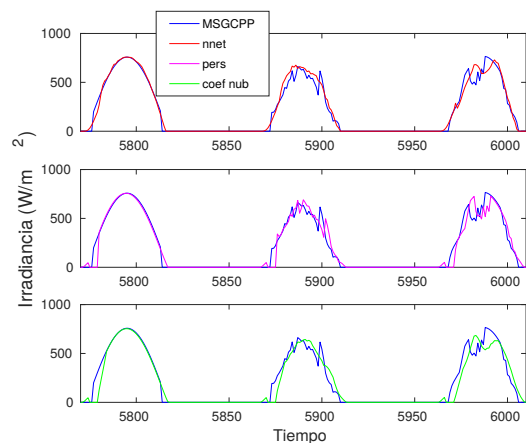


Figura 5: Comparación de los modelos de predicción de irradiancia para tres días.

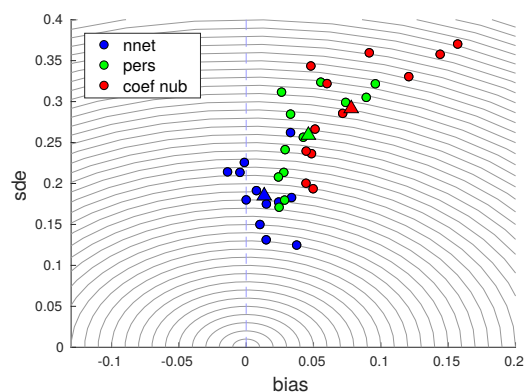


Figura 6: Resultados de los modelos de predicción para una hora con los datos de la UJI año 2015. Con puntos se representa la media mensual de cada modelo, y con triángulos la anual para los dos ejes: error sistemático (bias) y desviación estándar (sde).

junto con los valores que se intentan predecir. Se puede apreciar que todos los métodos son capaces de predecir con gran precisión días soleados pero no ocurre lo mismo con los días nublados donde cometen errores significativos.

Por ello, al igual que en el estudio de los modelos de estimación a partir de datos de satélite, los resultados han sido representados en un gráfico con dos ejes, bias y desviación estándar, para la media de cada mes del año evaluado. La figura 6 muestra los resultados para los modelos de predicción comparados de esta forma, donde se pueden apreciar de una manera mucho más clara las diferencias.

Como se puede observar en esta figura, la red neuronal, representada en azul, produce los mejores resultados tanto en error sistemático como

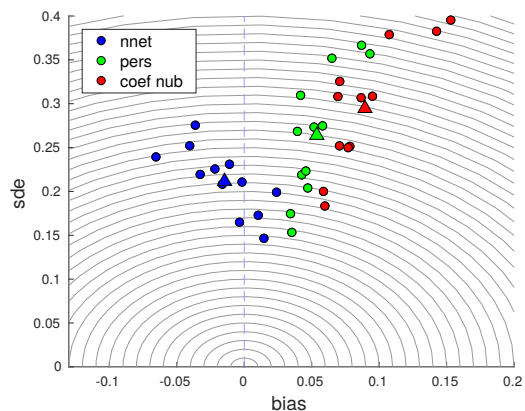


Figura 7: Resultados de los modelos de predicción para una hora con los datos de Marinha da Ondas año 2015. Con puntos se representa la media mensual de cada modelo, y con triángulos la anual para los dos ejes: error sistemático (bias) y desviación estándar (sde).

en desviación estándar. La media anual, mostrada con un triángulo en lugar del círculo que representa la mensual, se encontrará próxima al 0 de error sistemático y alrededor de 0.18 de desviación estándar. El modelo persistente, dibujado en verde, produce mejores resultados que el de coeficiente de nubosidad ya que la mayoría de días son soleados y por tanto una única medición es suficiente para estimar la claridad del día y de este modo la irradiancia.

Los modelos simples tienen una desviación sistemática positiva causada por la necesidad de estimar un valor al comienzo del día cuando aún no se dispone de ninguna medida. En estos casos se estima un día próximo al ideal, que en muchas ocasiones no resulta ser cierto, y por tanto la media acaba estando desviada positivamente. Esto es aún más notable en el modelo de coeficiente de nubosidad.

Otro resultado positivo de la red neuronal es que produce resultados más fiables a lo largo del año, las medias mensuales se encuentran más cercanas, evidenciando que los resultados son más consistentes. La causa de este comportamiento es que los modelos de predicción simples se basan en que las condiciones del día se mantengan estables, cosa que no siempre ocurre, en consecuencia los resultados de predicción de meses donde no se cumple están muy desviados de la media.

En cuanto a la generalización de la red neuronal, en la figura 7 se presentan los resultados de predicción para una localización en la que la red neuronal no se ha entrenado. Es decir, además de ser datos de un año diferente como el caso anterior,

son datos de una localización diferente. En este caso la red neuronal no puede conocer detalles de la entrada que le ayuden a la hora de predecir, por ejemplo componentes de viento habituales o especificidades geográficas.

Estos resultados muestran que la red obtiene resultados muy similares en media, aunque un poco menos consistentes. La red neuronal sigue siendo el mejor modelo de predicción de los comparados, siendo capaz de predecir radiación razonablemente bien en un lugar en el que no ha sido entrenada. En concreto, la red alcanza un error sistemático cercano al -0.01 de bias y 0.20 de desviación estándar.

Queda demostrada por tanto la capacidad de generalizar de la red neuronal, cuyos resultados podrían mejorarse reentrenando con datos de otros años de la misma localización, pero que aún así produce una previsión más precisa.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se han estudiado dos de los métodos existentes para la estimación de la irradiancia solar sobre la superficie terrestre a partir de datos de satélite con una granularidad de 15 minutos. Se han comparado ambos métodos con mediciones reales de un piranómetro, obteniéndose un mejor resultado con el servicio MSGCPP, basado en el algoritmo *Cloud Physical Properties*.

Además, se ha propuesto una red neuronal artificial para la predicción de la irradiancia en una ubicación determinada con una hora de antelación. Por último, se ha analizado la efectividad de dicha predicción para datos de validación no utilizados en el entrenamiento (en un año y localización diferentes). Con el modelo de predicción propuesto se ha obtenido una medida de error significativamente menor que la observada para métodos de predicción más sencillos utilizados en otras aplicaciones.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente realizado bajo los proyectos “Dimensionado y uso óptimo de sistemas de almacenamiento de energía en microrredes y redes de distribución inteligentes” (P1-1B2015-36) e “Integración de fuentes de energía renovables y control de flujos de potencia en redes HVDC mediante convertidores modulares multi-nivel” (DPI2014-53245-R) financiados, respectivamente, por la Universitat Jaume I de Castellón y el Ministerio de Economía junto con los fondos europeos FEDER.

Referencias

- [1] Secretariat REN21, “Renewables 2016 global status report,” *REN21, Paris, Tech. Rep.*, 2016.
- [2] A. Jäger-Waldau, “Pv status report 2016,” *JRC Science for Policy Report (Publications Office of the European Union, 2016)*, 2016.
- [3] F. Katiraei and J. R. Aguero, “Solar pv integration challenges,” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 9, no. 3, pp. 62–71, 2011.
- [4] C. Palmieri, “Energy storage in abu dhabi and dubai – a closer look,” *EES International – The Electrical Energy Storage Magazine*, 2016.
- [5] M. M. Thackeray, C. Wolverton, and E. D. Isaacs, “Electrical energy storage for transportation—approaching the limits of, and going beyond, lithium-ion batteries,” *Energy & Environmental Science*, vol. 5, no. 7, pp. 7854–7863, 2012.
- [6] B. McCloskey, D. Bethune, R. Shelby, T. Mori, R. Scheffler, A. Speidel, M. Sherwood, and A. Luntz, “Limitations in rechargeability of li-o2 batteries and possible origins,” *The journal of physical chemistry letters*, vol. 3, no. 20, pp. 3043–3047, 2012.
- [7] G. Girishkumar, B. McCloskey, A. Luntz, S. Swanson, and W. Wilcke, “Lithium- air battery: promise and challenges,” *The Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 1, no. 14, pp. 2193–2203, 2010.
- [8] H. Beltran, J. Barahona, R. Vidal, J. Alfonso, C. Ariño, and E. Pérez, “Ageing of different types of batteries when enabling a pv power plant to enter electricity markets,” in *Industrial Electronics Society, IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE*. IEEE, 2016, pp. 1986–1991.
- [9] W. Greuell, J. F. Meirink, and P. Wang, “Retrieval and validation of global, direct, and diffuse irradiance derived from SEVIRI satellite observations,” *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 118, no. 5, pp. 2340–2361, 2013.
- [10] B. Espinar, C. Hoyer-Klick, M. Lefèvre, M. Schroedter-Homscheidt, and L. Wald, “USER ’S GUIDE to the MACC-RAD Services on solar energy radiation resources March 2015,” no. March, 2015.

- [11] A. Woyte, K. D. Brabandere, B. Sarr, and M. Richter, "The quality of satellite-based irradiation data for operations and asset management," in *32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition THE*, 2016, pp. 1470–1474.
- [12] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, "Deep learning," *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 436–444, 2015.
- [13] K. Simonyan and A. Zisserman, "Very deep convolutional networks for large-scale image recognition," *arXiv preprint arXiv:1409.1556*, 2014.
- [14] P. Baldi, P. Sadowski, and D. Whiteson, "Searching for exotic particles in high-energy physics with deep learning," *Nature communications*, vol. 5, 2014.
- [15] J. Ma, R. P. Sheridan, A. Liaw, G. E. Dahl, and V. Svetnik, "Deep neural nets as a method for quantitative structure-activity relationships," *Journal of chemical information and modeling*, vol. 55, no. 2, pp. 263–274, 2015.
- [16] A. McAfee, E. Brynjolfsson, T. H. Davenport, D. Patil, and D. Barton, "Big data," *The management revolution. Harvard Bus Rev*, vol. 90, no. 10, pp. 61–67, 2012.
- [17] E. Lorenz and D. Heinemann, "Prediction of solar irradiance and photovoltaic power," *Comprehensive Renewable Energy*, vol. 1, pp. 239–292, 2012.
- [18] L. M. Aguiar, B. Pereira, M. David, F. Diaz, and P. Lauret, "Use of satellite data to improve solar radiation forecasting with bayesian artificial neural networks," *Solar Energy*, vol. 122, pp. 1309–1324, 2015.
- [19] H. Beltran, E. Perez, N. Aparicio, and P. Rodriguez, "Daily solar energy estimation for minimizing energy storage requirements in pv power plants," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 2, pp. 474–481, 2013.
- [20] E. Perez, H. Beltran, N. Aparicio, and P. Rodriguez, "Predictive power control for pv plants with energy storage," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 2, pp. 482–490, 2013.

MODELO DINÁMICO ORIENTADO AL TRATAMIENTO Y SEGUIMIENTO DE LA LEUCEMIA MIELOIDE CRÓNICA

Gabriel Pérez Rodríguez, Fernando Morilla

Departamento de Informática y Automática, ETSI Informática, UNED, C/. Juan del Rosal 16, Madrid, España

Email: fmorilla@dia.uned.es

Resumen

La leucemia mieloide crónica (LMC) es una enfermedad grave, que se manifiesta, en la mayoría de los casos, en edad madura y la padecen entre 1 y 2 individuos por cada 100.000 habitantes cada año. En este trabajo se presenta un modelo dinámico, completamente parametrizado, capaz de simular las primeras fases de la LMC y de simular la acción de los fármacos. El modelo ha servido para valorar la importancia que el Punto de Diagnóstico tiene en el tratamiento de la enfermedad. Y también ha servido para valorar que un diagnóstico precoz de la LMC abre posibilidades a tratamientos con dosis de fármaco menores a las actuales. Tratamientos que favorecerían la disminución de los efectos secundarios provocados por el fármaco.

Palabras Clave: Leucemia mieloide crónica, hematopoyesis, modelos por compartimentos.

1. INTRODUCCIÓN

La leucemia mieloide crónica (LMC) es una enfermedad grave, la padecen entre 1 y 2 individuos por cada 100.000 habitantes cada año [3, 19], en [18] se muestra su incidencia en España. Está ocasionada por una proliferación incontrolada de células mutadas (leucémicas) que se acumulan en la médula ósea y en la sangre compitiendo con las células sanas. Su evolución, sin la administración de fármacos, manifiesta las cuatro fases mostradas en la Figura 1.

Fase de Crecimiento. Esta fase comienza con la aparición de una célula con el gen Bcr-Abl [22]; el crecimiento asintomático de la población celular mutada se estima entre 4 y 5 años, a partir de aquí tiene lugar lo que se denomina Fase Crónica. En esta fase, con una duración entre 3 y 6 años, hay una elevada producción diaria de células leucémicas lo que provoca un declive de la población de células sanas, tanto en la médula como en la sangre. Fase acelerada. La coexistencia de células sanas y células leucémicas, característica de la fase anterior, deja de ser orgánicamente posible, dando paso a una situación de mayor predominio de las células leucémicas, conocida como fase acelerada, con una duración aproximada de 6 meses [25]. Fase aguda

(crisis blástica). En esta fase la cantidad de células leucémicas aumenta exponencialmente provocando graves desórdenes en menos de un año.

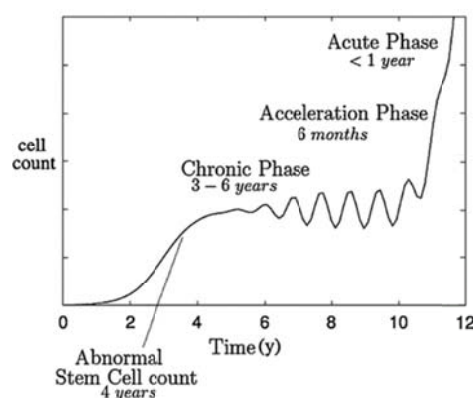


Figura 1: Fases de la enfermedad LMC [2].

Actualmente al 90% de los pacientes en España se les diagnostica la enfermedad en su fase crónica. Concretamente en lo que se denomina el Punto de Diagnóstico (PD), donde la proporción entre células sanas y leucémicas se encuentra en el rango del 5 al 20% [6]. Según [5] el PD se sitúa entre los 5 y 7 años (1800 y 2500 días) tras la aparición de la primera célula mutada.

La LMC es el primer cáncer humano con tratamiento molecular (fármacos “diana”) [16]. Entre estos fármacos se encuentra el *imatinib*¹; potente inhibidor de la tirosina kinasa Bcr-Abl, que generalmente induce a una remisión en todos los estados de la enfermedad. Sin embargo en algunos casos permanecen células leucémicas residuales en la médula ósea (en estado de quiescencia) [14] que pueden originar un repunte de la enfermedad. Por otra parte una fracción de pacientes desarrollan, durante la administración continuada del fármaco [1], una resistencia o intolerancia al fármaco debido a otras mutaciones de las células leucémicas.

La hematopoyesis o Sistema Hematopoyético (SH), es el nombre empleado para englobar a todos los mecanismos biológicos que intervienen en la generación de las células de la sangre. Se trata de un

¹ <https://www.novartis oncology.com/news/producto-portfolio/glivec>

proceso extraordinariamente complejo, cuyo modelado matemático ha suscitado un gran interés en los últimos años [2, 4, 5, 6, 10, 11, 14, 15, 22, 25, 26]. La aproximación más común pasa por suponer que las células de la médula ósea se estructuran en compartimentos, como los representados en la Figura 2, según los grados similares de madurez y de linaje. De manera que la dinámica asociada a la población en cada uno de los compartimentos se puede modelar teniendo en cuenta los mecanismos básicos de la división celular. Mientras que la producción celular del SH está regulada por señalizaciones homeostáticas procedentes de los diferentes órganos.

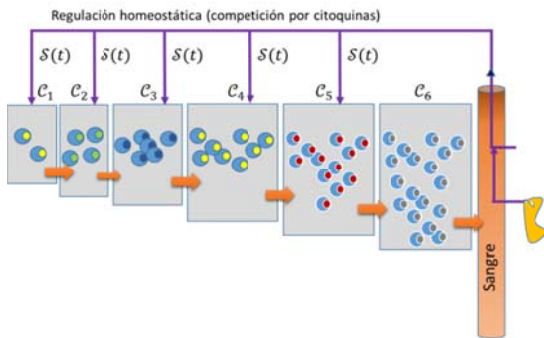


Figura 2: Esquema de hematopoyesis en seis compartimentos, un solo linaje y citoquina común en todos los compartimentos.

Este trabajo presenta parte de las tareas acometidas durante la realización del Trabajo de Fin de Máster de uno de los autores [20]. Con especial atención a la justificación y descripción de un modelo dinámico lo suficientemente complejo como para que sea útil en el tratamiento y seguimiento de la LMC. El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección 2 se describe el núcleo principal del modelo matemático, así como su parametrización para cumplir con la funcionalidad deseada. En la sección 3 se amplía el modelo para tener en cuenta la acción de los fármacos, y se recrean varios escenarios en relación con el tratamiento y seguimiento que se desencadenan tras un diagnóstico de LMC.

2. MODELO DINÁMICO DEL SISTEMA HEMATOPOYÉTICO CON LMC

El modelo dinámico que se presenta en esta sección se basa en los trabajos de A. Marciniak-Czochra et al. [11]. Considera un linaje para las células sanas y otro linaje para las células leucémicas. Existen evidencias [10, 24, 25] de que el proceso de la enfermedad LMC opera en paralelo a la producción de células sanas. Ambos linajes con seis compartimientos para representar la transformación y maduración celular. Donde el sexto compartimento en ambas poblaciones es de tránsito hacia la sangre periférica.

Por ejemplo el esquema de la Figura 2 serviría para representar los compartimentos de las células sanas. El primer compartimento se asocia a las células más primitivas, que son las células madre (denominadas también células *long-term stem*). El segundo a las células madre a corto plazo (*short-term stem*). El tercero a las células multipotentes progenitoras. El cuarto a las células progenitoras. El quinto a las células precursoras. Y el sexto a las células maduras, listas para cumplir su función en la corriente sanguínea.

El modelo consta de dos grupos de ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales. En total doce ecuaciones, una ecuación diferencial por cada compartimento en las respectivas poblaciones. El primer grupo, (1) a (6), describe la dinámica de las células sanas y el segundo, (7) a (12), describe la dinámica de las células leucémicas. Las ecuaciones diferenciales se complementan con tres ecuaciones algebraicas que describen los funcionales asociados respectivamente a la señalización homeostática (13), y a la competencia entre las dos poblaciones (14) y (15). Por simplicidad en las ecuaciones, se ha prescindido de la referencia al tiempo en las variables $c_i(t) = c_i$, $l_i(t) = l_i$, $S(t) = s$, $M_c(t) = m_c$ y $M_l(t) = m_l$. Donde c_i y l_i representan los volúmenes celulares en los respectivos compartimentos.

$$\frac{dc_1}{dt} = 2a_1sp_1c_1 - p_1c_1 - m_c c_1 \quad (1)$$

$$\frac{dc_2}{dt} = 2a_2sp_2c_2 - p_2c_2 + 2(1 - a_1s)p_1c_1 - m_c c_2 \quad (2)$$

$$\frac{dc_3}{dt} = 2a_3sp_3c_3 - p_3c_3 + 2(1 - a_2s)p_2c_2 - m_c c_3 \quad (3)$$

$$\frac{dc_4}{dt} = 2a_4sp_4c_4 - p_4c_4 + 2(1 - a_3s)p_3c_3 - m_c c_4 \quad (4)$$

$$\frac{dc_5}{dt} = 2a_5sp_5c_5 - p_5c_5 + 2(1 - a_4s)p_4c_4 - m_c c_5 \quad (5)$$

$$\frac{dc_6}{dt} = 2(1 - a_5s)p_5c_5 - dc_6 \quad (6)$$

$$\frac{dl_1}{dt} = 2a_{l1}sp_{l1}l_1 - p_{l1}l_1 - m_l l_1 \quad (7)$$

$$\frac{dl_2}{dt} = 2a_{l2}sp_{l2}l_2 - p_{l2}l_2 + 2(1 - a_{l1}s)p_{l1}l_1 - m_l l_2 \quad (8)$$

$$\frac{dl_3}{dt} = 2a_{l3}sp_{l3}l_3 - p_{l3}l_3 + 2(1 - a_{l2}s)p_{l2}l_2 - m_l l_3 \quad (9)$$

$$\frac{dl_4}{dt} = 2a_{l4}sp_{l4}l_4 - p_{l4}l_4 + 2(1 - a_{l3}s)p_{l3}l_3 - m_l l_4 \quad (10)$$

$$\frac{dl_5}{dt} = 2a_{l5}sp_{l5}l_5 - p_{l5}l_5 + 2(1 - a_{l4}s)p_{l4}l_4 - m_l l_5 \quad (11)$$

$$\frac{dl_6}{dt} = 2(1 - a_{l5}s)p_{l5}l_5 - dl_6 \quad (12)$$

$$s = \frac{1}{1 + kc_c} \quad (13)$$

$$m_c = \begin{cases} 0 & \text{si } l_1 = 0 \\ \frac{\sum_1^5(c_i + l_i)}{k_c + \sum_1^5(c_i + l_i)} & \text{si } l_1 > 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$m_l = \frac{\sum_1^5(c_i + l_i)}{k_l + \sum_1^5(c_i + l_i)} \quad (15)$$

En este conjunto de ecuaciones están implícitas las siguientes hipótesis:

- La auto-renovación y la diferenciación celular se producen en el mismo instante de tiempo [8].
- Todas las poblaciones, excepto las células maduras (c_6 y l_6) tienen asignadas tasas de proliferación (p_i , p_{li}) y fracciones de auto-renovación (a_i , a_{li}) independientes del tiempo.
- La muerte celular únicamente se considera significativa en las células maduras, y se representa mediante la tasa d , la misma en ambas poblaciones.
- Existen evidencias de que la mutación Bcr-Abl conserva lo mecanismos de recepción de citoquinas en la membrana celular en todos los compartimentos [12, 17, 21]. Por tanto la realimentación hacia las dos poblaciones celulares se incorpora a través del mismo funcional homeostático $\mathcal{S}(t)$ (competición por citoquinas) [13]. Por simplicidad se ha optado por emplear un funcional represor de tipo Hill [11], y dependiente únicamente de las células maduras (c_6). Considerar funcionales diferentes \mathcal{S}_i para cada compartimento celular, como en [10], añadiría una complejidad excesiva al modelo.
- La competición por nicho (la médula ósea) entre las células leucémicas y las células sanas se incorpora mediante los dos funcionales $\mathcal{M}_c(t)$ y $\mathcal{M}_l(t)$, afectando a la muerte celular salvo a las células maduras (c_6 y l_6). Por simplicidad se ha optado por emplear funcionales activadores de tipo Hill [11], el mismo para cada grupo de población, y dependiente en ambos casos de la población total de células; las sanas y las leucémicas.

2.1 PARAMETRIZACIÓN DEL MODELO PARA DESCRIBIR UN SH SANO

En ausencia de células leucémicas ($l_i = 0, \forall i$) el modelo matemático queda reducido a las siete ecuaciones, (1) a (6) y (13), que bastan para describir un SH sano. Pero para completar el modelo hace falta asignar valores a sus doce parámetros, por ejemplo los recogidos en la Tabla 1. Para la tasa d , las tasas de proliferación p_i y las fracciones de auto-renovación a_i se han empleado los mismos valores que Marciniak-Czochra et al. [9]. El último parámetro k se ha determinado con el siguiente objetivo: En ausencia de células leucémicas, el modelo debe ser capaz de recrear una producción celular diaria estable desde la médula ósea (c_6), estimada en 2.21×10^{11} células en un adulto de 60 kg de peso.

La estabilidad impuesta para la producción en este último compartimento (el de las células sanas maduras) también se refleja en el resto de compartimentos del modelo. Por tanto, denotando el punto de equilibrio por $(\bar{c}_1, \bar{c}_2, \bar{c}_3, \bar{c}_4, \bar{c}_5, \bar{c}_6)$, se

demuestra [20] que los valores alcanzables son los recogidos en la Tabla 1. En este equilibrio también queda determinado el valor del funcional homeostático.

Tabla 1: Parámetros, poblaciones celulares y funcional homeostático característicos de un Sistema Hematopoyético sano.

Parámetros		Células en los seis compartimentos	
a_1	0.70	\bar{c}_1	4.07×10^7
a_2	0.65	\bar{c}_2	4.26×10^8
a_3	0.65	\bar{c}_3	4.27×10^9
a_4	0.65	\bar{c}_4	3.20×10^{10}
a_5	0.55	\bar{c}_5	1.60×10^{11}
p_1	0.125	\bar{c}_6	2.21×10^{11}
p_2	0.167		
p_3	0.25		
p_4	0.5	Funcional homeostático	
p_5	0.5	s	0.7143
d	0.44		
k	1.81×10^{-12}		

El modelo así parametrizado, además de servir para reproducir el estado basal del SH, vale para recrear la regulación implícita en el SH; pues éste es capaz de recuperar el valor basal de producción de células maduras c_6 para la sangre después de una alteración (donación de sangre, por ejemplo). Ese fenómeno es el que se ha recreado en la Figura 3 mediante una alteración brusca pero de corta duración en la tasa d .

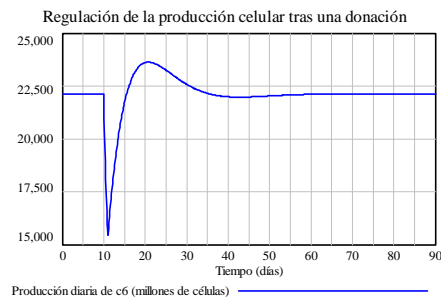


Figura 3: Ejemplo de la regulación implícita en el Sistema Hematopoyético.

2.2 PARAMETRIZACIÓN DEL MODELO PARA DESCRIBIR LA LMC

Con la aparición de una célula ph^{+2} , que se incorpora en el compartimento l_1 del modelo, éste debe ser capaz de simular la Fase de crecimiento asociada a la LMC, comentada en la introducción. Pero además, la proliferación de las células leucémicas en esta fase de crecimiento se tiene que producir en paralelo con un declive de la población de células sanas. Pero este declive no puede ser excesivo, de forma que se llegue

² Denominación para las células con cromosoma Filadelfia. En contraposición ph^{-} = células no mutadas

a la Fase crónica, en aproximadamente 5 a 6 años, con una ausencia de sintomatología. Justificable por la coexistencia estable en el tiempo de células leucémicas y de células sanas con predominio de las leucémicas. Por tanto, estos requisitos son los que se deberían emplear para asignar valores al resto de parámetros del modelo; a_{li} , p_{li} , k_c y k_l .

Por otro lado, algunos autores [5, 6] defienden que la ventaja competitiva intrínseca de las células leucémicas respecto a las células sanas basta considerarla en el primer compartimento, el de las células madre. Asignando a la tasa de proliferación p_{l1} y a la fracción de auto-renovación a_{l1} valores superiores a los p_1 y a_1 de la Tabla 1 [9, 17]. Mientras que para el resto de tasas de proliferación y fracciones de auto-renovación se deberían emplear los mismos valores de la Tabla 1. Con estas restricciones adicionales, el modelo LMC quedará completamente parametrizado con valores concretos para los parámetros: a_{li} , p_{li} , k_c y k_l .

En la Tabla 2 se puede constatar el resultado de una parametrización concreta del modelo LMC. Mientras que la evolución temporal de las producciones diarias de células maduras (c_6 y l_6) hacia el corriente sanguíneo se han recogido en la Figura 4. Donde la aparición de una célula leucémica en el compartimento l_1 se ha hecho coincidir con el inicio de la simulación. Se observa que la producción de células leucémicas l_6 supera la cifra de 10^{12} células diarias en aproximadamente 2190 días (6 años), muy cerca del que sería su estacionario final; 1.06×10^{12} según la Tabla 2. Por otro lado, la producción de células sanas c_6 en esos 6 años se ha situado por debajo de la cifra 1.70×10^{11} , cerca del que sería su estacionario final; 1.61×10^{11} según la Tabla 2. Estos valores representan reducciones del 23% y del 27% respecto al valor basal (2.21×10^{11}) que tenía el Sistema Hematopoyético sano. Por tanto justifican bastante bien la ausencia de síntomas en el inicio de la fase crónica de la LCM [16].

3. AMPLIACIÓN DEL MODELO CON LA ACCIÓN DE LOS FÁRMACOS

El diagnóstico de la LMC se suele ratificar a través de pruebas hematológicas y citogenéticas de la existencia y abundancia de la mutación Bcr-Abl. Este diagnóstico se puede resumir, en base a las variables del modelo, mediante la siguiente ratio [15]:

$$\frac{BCR-ABL}{ABL} = \frac{l_6}{2c_6 + l_6} \times 100 \quad (16)$$

De manera que cuanto mayor sea el predominio de la producción l_6 sobre la producción c_6 , más próximo se

encontrará este ratio del valor 100. En la mayoría de los casos el paciente se encuentra en fase crónica con producciones celulares diarias próximas a las recogidas en la Tabla 2. Luego la ratio estaría algo por debajo del valor 77 que se obtiene con las producciones \bar{c}_6 y \bar{l}_6 de la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros adicionales, poblaciones celulares y funcionales característicos de la LMC en la fase crónica.

Parámetros adicionales		Células en los doce compartimentos	
a_{l1}	0.79	\bar{c}_1	2.72×10^6
a_{l2}	0.65	\bar{c}_2	3.31×10^6
a_{l3}	0.65	\bar{c}_3	6.17×10^8
a_{l4}	0.65	\bar{c}_4	2.10×10^{10}
a_{l5}	0.55	\bar{c}_5	1.23×10^{11}
p_{l1}	0.173	\bar{c}_6	1.61×10^{11}
p_{l2}	0.167	\bar{l}_1	5.96×10^8
p_{l3}	0.25	\bar{l}_2	2.13×10^9
p_{l4}	0.5	\bar{l}_3	9.55×10^9
p_{l5}	0.5	\bar{l}_4	6.70×10^{10}
k_c	1.1×10^{14}	\bar{l}_5	9.40×10^{11}
k_l	2.9×10^{13}	\bar{l}_6	1.06×10^{12}
Funcionales			
		s	0.7741
		m_c	0.0104
		m_l	0.0386

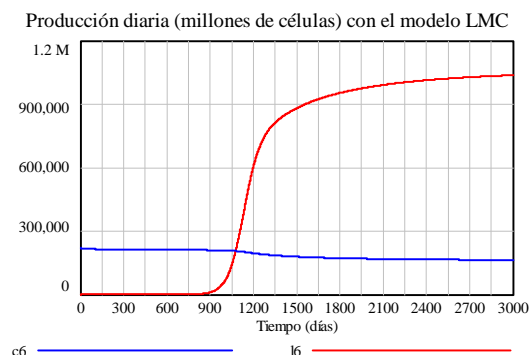


Figura 4: Ejemplo de recreación de las Fases de Crecimiento y Crónica de la LMC.

Tras confirmar el diagnóstico se procede a la administración diaria de un fármaco TKI, que en general es imatinib de 400 mg. La acción del fármaco se puede incorporar en el modelo como una tasa adicional de muerte F_{li} en los cinco primeros compartimentos de las células leucémicas. Pues hay constancia científica de que el fármaco no actúa en la población de células LMC circulantes l_6 dado que éstas mueren por muerte natural en la corriente sanguínea. Pero además, también hay constancia científica de que el fármaco no actúa con la misma intensidad en los compartimentos, sino que $F_{l1} < F_{l2} < F_{l3} < F_{l4} < F_{l5}$. La base biológica de esta hipótesis es la naturaleza de las curvas bifásicas que se obtienen en la fase del tratamiento [5, 14].

La ecuación (17) muestra cómo se modifica la ecuación (11) del modelo LMC al incorporar la acción del fármaco. Y de forma similar se modifican las ecuaciones (7) a (10). Los parámetros necesarios están recogidos en la Tabla 3.

$$\frac{dl_5}{dt} = 2a_{15}s p_{15}l_5 - p_{15}l_5 + 2(1 - a_{14}s) p_{14}l_4 - m_1l_5 - F_{15}l_5 \quad (17)$$

Tabla 3: Parámetros asociados a los fármacos.

F_{11}	0.0235
F_{12}	0.0288
F_{13}	0.033
F_{14}	0.065
F_{15}	0.125

3.1 SEGUIMIENTO DE LA LCM

La curva bifásica constituye el principal instrumento para el seguimiento de la LMC en los pacientes sometidos a tratamiento. Consiste en evaluar periódicamente (a los 3, 6, 12, 18 meses) la ratio (16), mediante el análisis hematológico. F. Michor, M. Glauche y I. Roeder han determinado que la Remisión Hematológica Completa (RHC) de la LMC se obtiene aproximadamente a los 200 días del comienzo del tratamiento para pacientes que no presentan mutaciones ni efectos secundarios al fármaco. La RHC se otorga con un ratio $\frac{BCR-ABL}{ABL}$ inferior o próximo a 10 [22, 25]. En base a la información proporcionada por estos autores se han podido asignar los valores concretos de la Tabla 4 para los cinco parámetros asociados a la acción del fármaco.

Con el nuevo modelo completamente parametrizado se ha podido replicar la curva bifásica de la Figura 5. El punto de inicio para la simulación, que marca el comienzo de la terapia con fármaco, ha sido un Punto de Diagnóstico elegido a los 1500 días (algo más de 4 años) después del inicio de la LCM en el ejemplo de la Figura 4. Se observa que en el PD la ratio tiene un valor aproximado de 71. Que ésta se reduce drásticamente por la acción del fármaco en el primer mes, situándose en torno al valor 20. Mientras que a los 180 días de terapia la ratio pasa a estar por debajo del 10%. Lo que otorgaría al paciente la RHC.

En la Figura 5 se han representado, junto a la evolución de la ratio $BCR-ABL/BCR$, dos exponenciales. Que debidamente combinadas servirían para aproximar las dos fases que se observan en la evolución de la ratio, de ahí el nombre de curva bifásica empleado en el seguimiento de la LMC. Las exponenciales están descritas respectivamente, para este ejemplo concreto, por las expresiones: $100 e^{-0.05t}$ y $20 e^{-0.004t}$. La primera

exponencial se ha elegido por representar un decrecimiento similar a la ratio en la primera fase de declive (40 a 60 días de terapia), sugiere una merma diaria de aproximadamente un 5% de células LMC (similar al obtenido por F. Michor [14]). Mientras que el declive en la segunda fase (resto de días de terapia) es mucho menor, y se aproxima al 0.4% en el día 140. El mismo decrecimiento que representa la segunda exponencial.

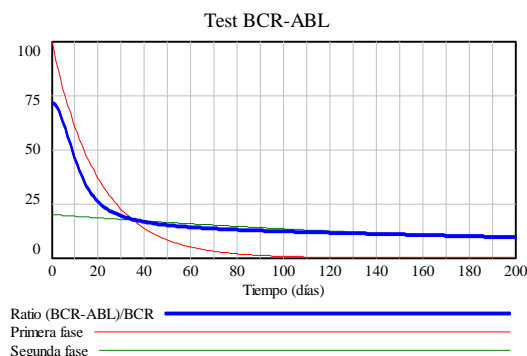


Figura 5: Ejemplo de recreación de la ratio BCR-ABL/BCR (curva bifásica).

Observando la evolución de las poblaciones de células leucémicas se puede comprobar que las poblaciones aguas abajo l_5 , l_4 , l_3 son las más afectadas por la acción del fármaco, en ese orden. Mientras que éste tiene poca eficacia en los compartimentos superiores y sobre todo en el compartimento l_1 (células madre leucémicas).

3.2 ADELANTO EN EL TRATAMIENTO Y SEGUIMIENTO DE LA LCM

En el apartado anterior se ha puesto de manifiesto que la detección de la LMC marca el inicio del tratamiento y seguimiento de la enfermedad. Pero como este Punto de Diagnóstico es muy dependiente de la sintomatología que el desarrollo de la LMC haya producido en el paciente, puede que esté adelantado o retrasado respecto a lo que sería un PD estándar.

La Figura 6 muestra curvas bifásicas simuladas con un mismo modelo, que representaría al mismo paciente tratado con la misma dosis de fármaco, al considerar distintas posiciones del Punto de Diagnóstico: 1800, 1600, 1400, 1200, 1100 y 1000 días. Al trazar la línea discontinua, que representa la ratio igual a 10, se observa que en todos los casos se alcanzaría la RHC en la ventana de los 200 días.

A la vista de los resultados de la Figura 6 también se percibe que un PD precoz (antes de 1800 días) abre la posibilidad a tratamientos con menores dosis de fármaco. Pero siempre y cuando la reducción en la dosis del fármaco garantizara un resultado clínico

aceptable (RHC antes de los 200 días del tratamiento), que a su vez vendría acompañado de una disminución de los efectos secundarios provocados por el fármaco. En la Figura 7 se han simulado tres escenarios de la curva bifásica para un PD a los 1200 días, el primero con la dosis estándar de fármaco, el segundo con una reducción del 10% y el tercero con una reducción del 20%. Se observa que con la reducción del 10% se sigue cumpliendo el requisito de RHC antes de los 200 días. Mientras que con la reducción del 20% ya no se cumple. Por tanto, al menos con un PD de diagnóstico a los 1200 días, la dosis del fármaco se podría reducir en un 10% garantizando la RHC en menos de 200 días.

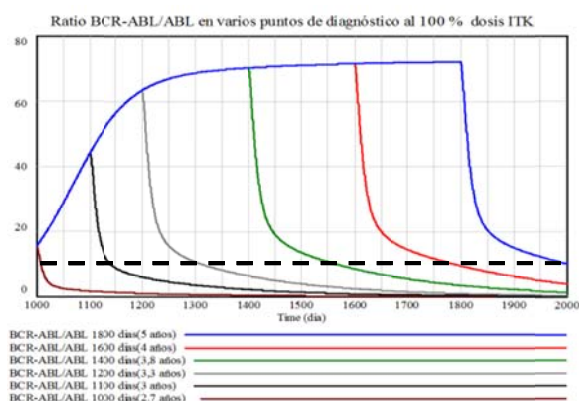


Figura 6: ratios BCR-ABL/ABL simulados para distintas posiciones del Punto de Diagnóstico.

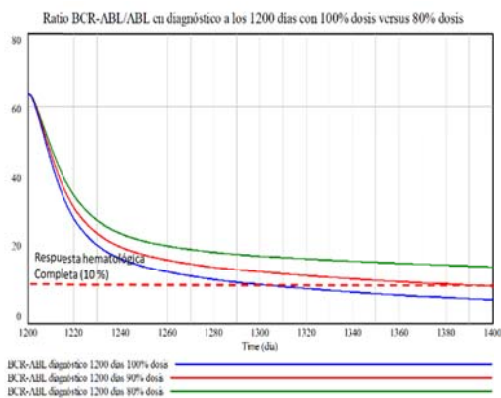


Figura 7: ratios BCR-ABL/ABL simulados con tres dosificaciones distintas para el Punto de Diagnóstico a los 1200 días.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se presenta un modelo dinámico de tipo compartimental para la Leucemia mieloide crónica (LMC). El modelo considera un linaje para las células sanas y otro linaje para las células leucémicas, con seis compartimentos en cada linaje. El modelo, que se presenta completamente parametrizado, es capaz de:

- Reproducir el estado basal del Sistema Hematopoyético (SH).
- Mostrar la regulación implícita en el SH.
- Recrear las Fases de Crecimiento y Crónica de la LMC.
- Generar la curva bifásica (evolución del ratio BCR-ABL/ABL) empleada para el seguimiento de la LMC en la fase de tratamiento.
- Probar distintos escenarios de Puntos de Diagnóstico (PD) y/o distintas dosis de fármaco.

El modelo se ha utilizado por ahora para valorar la importancia que el PD tiene en el tratamiento de la enfermedad. Y también para valorar que un diagnóstico precoz de la LMC abre posibilidades a tratamientos con dosis de fármaco menores a las actuales. Pero ya se está trabajando en un sistema de personalización de la LCM, donde el modelo se pueda entrenar con datos registrados en los tratamientos a pacientes. El sistema tendrá una doble funcionalidad: la particularización (mediante los parámetros más importantes del modelo) a lo observado en el paciente, y la predicción sobre la evolución de la LMC en dicho paciente si se mantiene o modifica su tratamiento.

Agradecimientos

Este trabajo no hubiera sido posible sin la ayuda y el asesoramiento del Dr. D. Jorge Sánchez-Calero Guilarte del Servicio de Hematología del Hospital Universitario de Móstoles y profesor en la Facultad de Medicina de la Universidad "Rey Juan Carlos".

Referencias

- [1] Bacarani, M., et al., «European LeukemiaNet Recommendations for the Management of Chronic Myeloid Leukemia: 2103,» *Blood*, vol. 122, 2013.
- [2] Berezansky, L., S. Bunimovich-Mendrazitsky, A. Domoshnitsky, «A mathematical model with time-varying delays in the combined treatment of chronic myeloid leukemia,» *Advances in Difference Equations*, vol. 217, 2012.
- [3] Buyukasik, Y., C. Haznedaroglu, O. Ilhan, «Chronic Myeloid Leukemia: Practical Issues in Diagnosis, Treatment and Follow-up,» *International Journal of Hematology and Oncology*, 2010.
- [4] Crowell, H.L., A.L. MacLean, M.P. Stumpf, «Feedback mechanism control coexistence in a stem cell model of acute myeloid leukemia,» *Journal of Theoretical Biology*, 2016.

- [5] Dingli, D., A. Traulsen, J.M. Pacheco, «Chronic Myeloid Leukemia: Origin, Development, Response to Therapy and Relapse,» *Clinical Leukemia*, vol. 2, nº 2, 2008.
- [6] Glauche, I, K. Horn, M. Horn, L. Thielecke, M. A. Essers, A. Trumpp, I.I. Roeder, «Therapy of chronic myeloid leukemia can benefit from the activation of stem cells: simulation studies of different treatment combinations,» *British Journal of Cancer*, 2012.
- [7] Jorgensen, H.G., T.L. Holyoake, «Characterization of cancer stem cells in chronic myeloid leukemia,» *Cancer*, 2007.
- [8] Kirouac, D.C., G.J. Madlambayan, M. Yu, E.A. Sykes, C. Ito, P.W. Zandstra, «Cell-cell interaction networks regulate blood stem and progenitor cell fate,» nº 293, 2009.
- [9] Lane, S.W., Y.J. Wang, C. Lo Celso, C. Raqu, L. Bullinger, S.M. Sykes, F. Ferraro, S. Shterental, C.P. Lin, D.G. Gilliland, D.T. Scadden, S.A. Armstrong, D.A. Willian, «Differential niche and Wnt requirements during acute myeloid leukemia progression,» *Blood*, 2011.
- [10] MacLean, A.L., S. Filippi, M.P. Stumpf, «The ecology in the hematopoietic stem cell niche determines the clinical outcome in chronic myeloid leukemia,» *PNAS*, 2014.
- [11] Marciniak-Czochra, A., T. Stiehl, A.D. Ho, W. Jager, W.T. Wagner, «Modeling of Asymmetric Cell Division in Hematopoietic Stem Cells-Regulation of Self-Renewal Is Essential for Efficient Repopulation,» *Stem Cells and Development*, vol. 18, 2009.
- [12] Maxson, J.E. et al., «Oncogenic CSF3R Mutations in Chronic Neutrophilic Leukemia and Atypical CML,» *The New England Journal of Medicine*, May 9, 2013.
- [13] Metcalf, D., «Hematopoietic cytokines,» *Blood*, 2007.
- [14] Michor, F., T.P. Hughes, Y. Iwasa, S. Branford, N.P. Shah, C.L. Sawyers, M.A. Nowak, «Dynamics of chronic myeloid leukaemia,» *nature*, vol. 435, 2005.
- [15] Michor, F., «Mathematical Models of Cancer Stem Cells,» *Journal of Clinical Oncology*, vol. 26, nº 17, June 2008.
- [16] Novartis, «Leucemia Mieloide Crónica,» 2012. https://www.ils.org/sites/default/files/file_assets/PS31S_CML_Booklet_2014_Spanish_FINAL.pdf
- [17] d'Onofrio, G., G. Zini, B.J. Bain, «Morphology of Blood Disorder,» *Wiley*, 2007.
- [18] Osorio, S., L.F. Casado, P. Giraldo, B. Maestro, M. Andrade, S. Redondo, V. García-Gutiérrez, R. Ayala, N. Garcia, J.L. Steegmann, «Chronic myeloid leukemia in Spain: Its presentation characteristics have changed,» *Revista Clínica Española*, 2016.
- [19] Pellicano, F., T. L. Holyoake, «Stem cells in chronic myeloid leukemia,» IOS press, 2007.
- [20] Pérez Rodríguez, G., «Análisis, modelado y simulación de sistemas y procedimientos matemáticos orientados al control del tratamiento de la Leucemia Mieloide Crónica,» Proyecto Fin de Máster, UNED, 2017.
- [21] Perl, A., M. Carroll, «BCR-ABL kinase is dead; long live the CML stem cell,» *The Journal of Clinical Investigations*, nº 1, 2011.
- [22] Roeder, I., M. Horn, I. Glauche, A. Hochhaus, M.C. Mueller, M. Loeffler, «Dynamic modeling of imatinib-treated chronic myeloid leukemia: functional insights and clinical implications,» *Nature Medicine*, 2006.
- [23] Traulsen, A., J.M. Pacheco, D. Dingli, «Reproductive fitness advantage of BCR-ABL expressing leukemia cells,» *Cancer Letters*, nº 294, 2010.
- [24] Wang, J.C., J.E. Dick, «Cancer stem cells: lessons from leukemia,» *Trends in Cell Biology*, vol. 15, 2005.
- [25] Whichard, Z.L., C.A. Sarkar, M. Kimmel, S.J. Corey, «Hematopoiesis and its disorders: a system biology approach,» *Blood*, vol. 115, nº12, 2010.
- [26] Wodart, D., «Stem cell regulation and the development of blast crisis in chronic myeloid leukemia: Implications for the outcome of Imatinib treatment and discontinuation,» *Medical Hypotheses*, vol. 70, 2008.

Modelado y optimización de la operación de un sistema de bombeo de múltiples depósitos

Roberto Sanchis e Ignacio Peñarrocha

D. Enginyeria de Sistemes Industrials i Disseny, University Jaume I, Castelló, Spain,

rsanchis@uji.es, ipenarro@uji.es

Resumen

Este trabajo estudia la optimización de la operación de un sistema de bombeo para suministro de agua por medio de solvers estándar. El sistema consta de varios tanques que abastecen de agua a varios distritos de una ciudad. Cada depósito puede ser llenado desde varios pozos a través de un sistema hidráulico que puede ser reconfigurado por medio de varias válvulas. La operación automatizada del sistema trata de determinar qué válvulas y bombas deben estar activas en cada instante para minimizar el coste de operación, teniendo en cuenta los periodos de tarificación. Se propone un modelo matemático del problema con el fin de formular, en forma matricial, el índice de coste y las restricciones, para poder utilizar solvers estándar como Mosek o CBC. Se trata de un problema de optimización mixta entera, que tiene un coste computacional elevado. Para reducir el coste se propone reducir el número de variables enteras, sustituyéndolas por variables reales a partir de un instante determinado en el horizonte de optimización. **Palabras clave:** optimización de bombeo, tarifa eléctrica, programación de bombeo.

1. INTRODUCCIÓN

Un coste importante en el funcionamiento de los sistemas de abastecimiento de agua es el coste energético asociado al sistema de bombeo. Los consumidores reciben el agua de los tanques de abastecimiento que se llenan de los pozos. El coste de operación depende de los instantes durante el día en que las bombas están funcionando, ya que la tarifa eléctrica varía a lo largo del día, siguiendo periodos predefinidos de tarificación.

El trabajo [4] presenta una revisión de diferentes enfoques para la optimización de sistemas de bombeo de agua, que dependen de la configuración del sistema y de los modelos matemáticos utilizados. Para el problema del llenado de los tanques principales, que es el objetivo de este trabajo, el modelo más comúnmente usado es el balance de masas. En la mayoría de los trabajos, la función de cos-

te toma en cuenta la energía consumida, pero no los periodos de tarificación cuando se consume esa energía. Por otro lado, las variables de decisión son usualmente la fracción del tiempo de operación de cada bomba en algunos intervalos predefinidos. También se han propuesto otras variables indirectas de decisión (como los volúmenes de los tanques), pero la relación con el índice de coste y la decisión final (las órdenes a las bombas y válvulas) es demasiado compleja para el caso que estamos estudiando.

En un trabajo más reciente, [1], se revisan diferentes enfoques, centrándose en las tecnologías de optimización dinámica en tiempo real para mejorar la eficiencia energética. Este trabajo describe un software de optimización comercial para sistemas de distribución de agua que puede resolver el problema que abordamos en este trabajo y otros más complejos, pero no se dan los detalles sobre los algoritmos utilizados.

La mayoría de los trabajos recientes, como [6], [7] o [2], utilizan modelos complejos de los sistemas hidráulicos y se basan en complejos algoritmos de optimización, como algoritmos genéticos, "particle swarm" o "simulated annealing". Esos enfoques tienen un coste computacional muy elevado, especialmente para sistemas grandes.

En [5], se utiliza un enfoque de programación lineal para la optimización del funcionamiento de las bombas, pero sólo es aplicable para un sistema de tanque único.

En [3] se presentan tres formulaciones explícitas diferentes del problema de programación óptima de la bomba. Tiene en cuenta la tarifa eléctrica, pero las variables de decisión definen los tiempos de arranque y parada de las diferentes bombas del sistema. El problema de optimización resultante tiene que ser resuelto por algoritmos no lineales, algoritmos genéticos o algoritmos ad hoc semi-heurísticos. Esta formulación explícita discreta no es aplicable directamente si el sistema tiene algunas válvulas que pueden reconfigurar la red. En ese caso no es suficiente decidir qué bombas se arrancan o paran en ese momento, sino también la conmutación de las válvulas, que cambia el flujo de

entrada resultante a los tanques para un estado de bombas dado. Además, nuestro objetivo es utilizar solucionadores estándar para tratar el problema de optimización. Por este motivo, en este trabajo, las variables de decisión son explícitas, pero consisten en la combinación de bombas y válvulas que deben estar activas en cada instante, a partir del conjunto de posibles combinaciones. La formulación matemática propuesta permite utilizar parsers estándar (como Yalmip) y solvers estándar (como CBC), para resolver el problema de optimización.

En la sección II se describe el problema de la operación óptima del sistema de bombeo. En la sección III se desarrolla el modelo matemático del problema. En la sección IV se formula el problema básico de optimización. Un problema de optimización más complejo se formula en la sección V para llegar a soluciones más prácticas, con un número reducido de conmutaciones de la bomba. La sección VI muestra la aplicación a un sistema de bombeo real y la sección VII resume las principales conclusiones.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Este trabajo trata del problema de optimizar el funcionamiento de un sistema de bombeo de agua con una estructura predefinida, con varios pozos y bombas, varios tanques y varios conductos y válvulas. El objetivo de la optimización es la minimización del coste operativo global. Este coste se relaciona con el coste energético individual de bombeo de cada pozo (kWh por metro cúbico) y, especialmente, con la tarifa eléctrica que establece un precio diferente dependiendo del periodo. El sistema de control automático debe decidir qué válvulas y qué bombas deben ser operadas en cada momento a lo largo del día para minimizar el coste y cumplir con algunas restricciones.

La principal restricción es servir a cada tanque el caudal diario de agua requerido. Este caudal es variable en el tiempo e incierto, pero puede predecirse porque sigue un patrón diario aproximado. La otra limitación importante se debe al tamaño de los tanques, cada uno con un nivel máximo y mínimo que no debe ser superado.

Otras limitaciones secundarias que pueden aplicarse incluyen limitar de alguna forma el número de arranques y paradas. También la condición de que, dentro de lo posible, los niveles de los tanques sean lo más elevados posible para tener más margen en caso de avería.

3. MODELADO MATEMÁTICO

En primer lugar, se supone que el sistema de bombeo tiene N_p bombas (o pozos), N_t tanques y N_v válvulas. Las válvulas se utilizan para reconfigurar el circuito hidráulico que conecta las bombas a los tanques. El número total de combinaciones posibles es $2^{N_p+N_v}$, pero no todas las combinaciones son posibles en un sistema dado. Definamos como N_c el número de combinaciones válidas de válvulas y bombas. Con el fin de formular matemáticamente el problema, se define una matriz binaria, M_c , de tamaño $N_c \times (N_p + N_v)$, donde cada fila representa una de las combinaciones válidas y donde los elementos correspondientes toman el valor 1 ó 0 dependiendo del estado activo o inactivo de las válvulas y de las bombas en esa combinación.

A lo largo del documento, se utiliza un ejemplo de aplicación, obtenido de una instalación real de suministro de agua, para ilustrar el enfoque propuesto. El sistema de bombeo considerado tiene $N_p = 3$ pozos (bombas), $N_v = 2$ válvulas y $N_t = 3$ tanques. La figura 1 muestra el esquema del sistema. El depósito 3 puede llenarse desde la bomba 1, sea cual sea el estado de las válvulas, o de la bomba 2, si la válvula 2 está abierta, o desde la bomba 3, también si la válvula 2 está abierta. El depósito 2 sólo puede llenarse desde la bomba 3 si la válvula 2 está cerrada y la válvula 1 abierta. Finalmente, el tanque 1 sólo puede llenarse desde la bomba 3 si ambas válvulas están cerradas. La bomba 1 y 3 pueden funcionar simultáneamente, pero la bomba 2 sólo puede funcionar si la bomba 3 está parada y la válvula 2 está abierta, porque no da altura suficiente para llenar los tanques 1 o 2. Teniendo en cuenta las limitaciones físicas

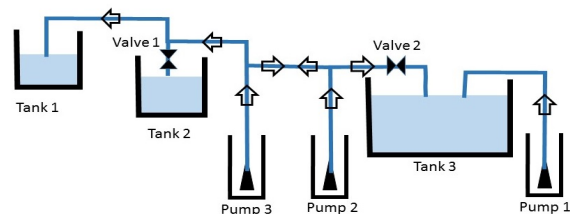


Figura 1: Esquema de la aplicación real.

descritas anteriormente, en la tabla 1 se muestra la matriz que define las combinaciones válidas de bombas y válvulas $N_c = 10$. El valor X representa que los caudales no dependen del estado de la válvula. Para cada combinación de válvulas y bombas, hay un caudal de salida resultante de cada bomba, y un caudal de entrada resultante para cada tanque. Esto puede expresarse mediante una matriz de caudales de bombeo, F_P , que tiene tantas columnas como combinaciones, y una fila por bomba, y una matriz de caudales de entrada

Cuadro 1: Combinaciones válidas en el ejemplo de aplicación.

Comb	V_1	V_2	P_1	P_2	P_3
0	X	X	0	0	0
1	0	0	0	0	1
2	1	0	0	0	1
3	X	1	0	0	1
4	X	1	0	1	0
5	X	X	1	0	0
6	0	0	1	0	1
7	1	0	1	0	1
8	X	1	1	0	1
9	X	1	1	1	0

de tanque, F_T , que tiene tantas columnas como combinaciones y una fila por tanque, es decir, el tamaño de las matrices F_P y F_T es $(N_p \times N_c)$ y $(N_t \times N_c)$. En el ejemplo de aplicación, las matrices de caudales resultantes son (en m^3/h):

$$F_P = 10 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 20 & 20 & 20 & 20 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \\ 0 & 8 & 10 & 12 & 0 & 0 & 8 & 10 & 12 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$F_T = 10 \begin{bmatrix} 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 12 & 10 & 20 & 20 & 20 & 32 & 30 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Siguiendo el mismo procedimiento, se puede formar una matriz P con el consumo de energía eléctrica de cada bomba para cada combinación. La matriz tiene tantas columnas como combinaciones, y una fila por bomba, es decir, el tamaño de la matriz P es $(N_p \times N_c)$. En el ejemplo propuesto, la matriz de potencia (en kW) es:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12 & 12 & 12 & 12 & 12 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \\ 0 & 13 & 11 & 7 & 0 & 0 & 13 & 11 & 7 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Para poder operar la instalación de suministro de agua, el sistema de gestión automática debe decidir cuál de esas combinaciones N_c debe aplicarse en cada instante de tiempo. El objetivo natural es minimizar el coste total de operación. Para poder formular el problema de optimización, se podría definir una variable que tomara valores enteros de 0 a N_c . Sin embargo, con el fin de formular más fácilmente la función objetivo así como las restricciones, se propone un vector binario para definir la combinación aplicada en función del tiempo:

$$\delta(t) \in \{\delta_1, \dots, \delta_{N_c}\} \quad (4)$$

donde

$$\delta_i = [0 \dots 0 \underset{i-1}{1} 0 \dots 0]^T \quad (5)$$

Por lo tanto, los elementos de $\delta(t)$ sólo pueden ser 0 o 1, y sólo uno de los elementos puede ser diferente de cero (la suma de los elementos es 1).

Con estas definiciones, el vector que reúne los caudales de entrada de los tanques en un instante dado es simplemente el producto

$$f_T(t) = F_T \delta(t)$$

, el vector de caudales de salida de las bombas es

$$f_P(t) = F_P \delta(t)$$

, mientras que el vector de potencia consumida por las bombas es

$$p(t) = P \delta(t)$$

Para calcular el coste total, debe tenerse en cuenta la tarifa eléctrica. La tarifa puede expresarse como una función que define el precio en *euro/kWh* en función del tiempo, $T_i(t)$. Cada bomba podría tener una tarifa diferente, por lo tanto, definimos un vector fila como:

$$T(t) = [T_1(t) \dots T_{N_p}(t)] \quad (6)$$

Con esto, el coste total en un periodo de tiempo puede expresarse

$$J = \frac{1}{3600} \int T(t) P \delta(t) dt \quad (7)$$

La ecuación de los tanques puede expresarse como:

$$\dot{V}_j = f_{T,j}(t) - f_{O,j}(t) \quad (8)$$

donde $f_{T,j}(t)$ y $f_{O,j}(t)$ son los caudales de entrada y salida del tanque j . Las ecuaciones de todos los tanques pueden unirse en forma matricial

$$\dot{V} = \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \vdots \\ \dot{V}_{N_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{T,1}(t) \\ \vdots \\ f_{T,N_t}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f_{O,1}(t) \\ \vdots \\ f_{O,N_t}(t) \end{bmatrix} = f_T(t) - f_O(t) \quad (9)$$

Como no se conoce el caudal de salida futuro de cada tanque, $f_O(t)$, se debe utilizar una predicción $\hat{f}_O(t)$ para estimar la evolución del volumen. Por otra parte, el caudal de entrada puede expresarse como una función de $\delta(t)$, por lo tanto, la ecuación utilizada para estimar la evolución del volumen de los tanques (en m^3/s) es

$$\dot{V} = \frac{1}{3600} (F_T \delta(t) - \hat{f}_O(t)) \quad (10)$$

donde los caudales están en m^3/h .

Con el fin de obtener una formulación manejable del problema, las ecuaciones de tiempo continuo deben ser discretizadas. Si se elige un periodo de discretización constante h (en segundos), las funciones vectoriales $T(t)$ y $\delta(t)$ serían entonces cambiadas por vectores de señales discretas $T[k] = T(t = Kh)$ y $\delta[k] = \delta(t = kh)$. $\delta(t)$ se supone que mantiene un valor constante durante el intervalo h , es decir $\delta(t) = \delta[k]$ para

$k h \leq t < (k+1)h$. Teniendo en cuenta las unidades de las variables, el índice de coste (en euros) podría expresarse como:

$$J = \frac{h}{3600} \sum T[k] P \delta[k] \quad (11)$$

La ecuación de tiempo continuo de los tanques también debe discretizarse en el periodo h . La ecuación discretizada puede expresarse como:

$$V[k+1] = V[k] + \frac{h}{3600} (F_T \delta[k] - \hat{f}_O[k]) \quad (12)$$

con $V[k] = V(t = k h)$, $\hat{f}_O[k] = \frac{1}{h} \int_{kh}^{(k+1)h} \hat{f}_O(t) dt$.

Las principales restricciones son los límites máximos y mínimos de los volúmenes de los tanques, por lo tanto, las restricciones pueden ser formuladas como

$$V_{i,min} \leq V_i[k] \leq V_{i,max}, \quad i = 1, \dots, N_t \quad (13)$$

o en forma matricial

$$V_{min} \leq V[k] \leq V_{max} \quad (14)$$

4. PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN BÁSICO

El problema básico de optimización consiste en minimizar el coste de la energía cumpliendo con las principales restricciones de mantener los volúmenes de todos los tanques dentro de su rango admisible (entre sus valores mínimo y máximo). Se debe añadir una restricción adicional para garantizar que los tanques terminen el día con el mismo volumen que han comenzado. De lo contrario, la solución óptima siempre terminará el día con los tanques completamente vacíos.

Teniendo en cuenta las ecuaciones introducidas en las secciones anteriores, con la definición de vectores $\delta[k]$, $T[k]$, $V[k]$ y $\hat{f}_O[k]$, horizonte de minimización $t_m = k_m h$, el problema de minimización puede ser formulado como:

$$\begin{aligned} \min_{\delta} \quad & \frac{h}{3600} \sum_{k=1}^{k_m} T[k] P \delta[k] \quad (15) \\ \text{s.t.} \quad & \\ V_{min} \leq \quad & V(0) + \frac{h}{3600} \sum_{j=1}^k (F_T \delta[j] - \hat{f}_O[j]) \leq V_{max} \\ & \sum_{j=1}^{k_m} (F_T \delta[j] - \hat{f}_O[j]) \geq 0 \\ & \sum_{i=1}^{N_c} \delta_i[k] = 1, \delta_i[k] \in \{0, 1\} \\ & k = 1, \dots, k_m \end{aligned}$$

El problema de optimización (15) es mixto entero, donde las variables de decisión son los elementos del vector Δ que sólo pueden tomar valores 0 o 1. El número de variables de decisión es $N_c k_m$, y el

número de restricciones es $(2N_c + 2N_t + 1)k_m + N_t$. Para un horizonte de predicción normal de 1 día, si se toma un periodo de discretización de 1 minuto, el número de variables es $1440N_c$, y el número de restricciones es $1440(2N_c + 2N_t + 1) + N_t$, que pueden ser muy grandes incluso para sistemas bastante simples. Además, la optimización mixta entera es muy exigente en recursos computacionales, y la optimización debe ejecutarse con frecuencia (no sólo una vez al día), porque depende de la predicción del caudal futuro $\hat{f}_O[k]$, que es incierta, y que se mejora a corto plazo a partir de las mediciones. Por ejemplo, podría ejecutarse cada 10 minutos. En ese caso, sólo se aplicarán los valores de $\delta[k]$ obtenidos durante los primeros 10 minutos, descartando el resto. Esta es una estrategia habitual en el control predictivo.

Por lo tanto, con el fin de reducir la complejidad, y suponiendo que sólo los primeros valores se aplicarán realmente, proponemos utilizar dos periodos de discretización, uno corto para los primeros instantes, h , y uno más largo para el resto del día, $h_M = Lh$. Además, con el fin de reducir aún más el coste computacional, y el error de discretización en los grandes periodos, se propone utilizar vectores δ reales en esos periodos, es decir, se permite que los valores de los elementos de δ tomen cualquier valor real de 0 a 1, pero con la restricción de que su suma es 1. El significado físico es que cada combinación de válvulas y bombas estaría activa durante una fracción del periodo largo, definida por el valor del elemento correspondiente de δ . Esta idea tiene dos efectos: por un lado, la restricción es menos severa que asumir que una combinación fija se aplica durante un periodo largo. Por otro lado, el coste computacional de la optimización se reduce, ya que el número de variables enteras se reduce drásticamente.

Por otra parte, el problema de optimización se puede expresar en forma matricial más compacta. Se define el horizonte de tiempo más corto como $t_m = k_m h$, y el horizonte de tiempo total $t_M = t_m + (k_M - k_m)Lh$, y se definen los vectores:

$$T[k] = \begin{cases} T(t = kh) & \text{if } k \leq k_m \\ T(t = k_m h + (k - k_m)Lh) & \text{if } k > k_m \end{cases} \quad (16)$$

$$\hat{f}_O[k] = \begin{cases} \frac{1}{h} \int_{kh}^{(k+1)h} \hat{f}_O(t) dt & \text{if } k \leq k_m \\ \frac{1}{Lh} \int_{k_m h + (k - k_m)Lh}^{k_m h + (k+1 - k_m)Lh} \hat{f}_O(t) dt & \text{if } k > k_m \end{cases} \quad (17)$$

Se definen los siguientes vectores y matrices:

$$\Delta = \begin{bmatrix} \delta[1] \\ \vdots \\ \delta[k_m] \end{bmatrix}_{k_M N_c \times 1} \quad (18)$$

$$\mathbf{T} = \frac{h}{3600} \begin{bmatrix} T[1] \cdots T[k_m] & T[k_m + 1]L \cdots T[k_M]L \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & P & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & P \end{bmatrix}_{k_M N_p \times k_M N_c} \quad (20)$$

$$\mathbf{F}_k = \begin{bmatrix} \underbrace{F_T \cdots F_T}_{k_m} & \underbrace{L F_T \cdots L F_T}_{k-k_m} & 0 \cdots 0 \end{bmatrix}_{N_t \times k_M N_c} \quad (21)$$

$$\mathbf{I}_k = \begin{bmatrix} \underbrace{0 \cdots 0}_{(k-1)N_c} & \underbrace{1 \cdots 1}_{N_c} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{1 \times k_M N_c} \quad (22)$$

$$\hat{F}_O[k] = \sum_{j=1}^{k_m} \hat{f}_o[j] + L \sum_{j=k_m+1}^k \hat{f}_o[j] \quad (23)$$

Con estas definiciones, el problema de minimización se puede formular como:

$$\begin{aligned} \min_{\Delta} \quad & \mathbf{TP}\Delta \\ \text{s.t.} \end{aligned} \quad (24)$$

$$\mathbf{F}_k \Delta \geq 3600 \frac{V_{min} - V(0)}{h} + \hat{F}_O[k], \quad k = 1, \dots, k_M$$

$$\mathbf{F}_k \Delta \leq 3600 \frac{V_{max} - V(0)}{h} + \hat{F}_O[k], \quad k = 1, \dots, k_M$$

$$\mathbf{F}_{k_M} \Delta \geq \hat{F}_O[k_M]$$

$$\mathbf{I}_k \Delta = 1, \quad k = 1, \dots, k_M$$

$$\Delta[j] \in \{0, 1\} \in \mathbf{N}, \quad j = 1, \dots, k_M N_c$$

$$\Delta[j] \in [0, 1] \in \mathbf{R} \quad j = k_M N_c + 1, \dots, k_M N_c$$

El número de variables de decisión enteras en el problema (24) es $N_c k_m$, y el número de variables de decisión reales es $N_c(k_M - k_m)$. El número de restricciones es $(2N_c + 2N_t + 1)k_M + N_t$.

5. PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN AVANZADO

El inconveniente principal del problema de optimización básico (24) es que la solución óptima tiende a implicar una gran cantidad de conmutaciones, es decir, las bombas y válvulas se detendrían y arrancarían cada pocos minutos. Este es un problema serio, ya que cada arranque y parada implica un desperdicio de energía y una reducción en la vida útil de los componentes hidráulicos. Por lo tanto, el problema de optimización debe ser modificado para lograr un número bajo de conmutaciones para que la propuesta sea útil.

Por otro lado, como estamos imponiendo un volumen final igual al inicial, el resultado de la optimización depende de la condición inicial de los

tanques y del instante de tiempo en que se realiza la optimización. Además, desde un punto de vista práctico, es interesante que al menos una vez al día, los tanques tengan el máximo volumen almacenado posible para hacer frente a problemas inesperados a lo largo del día. Por lo tanto, proponemos imponer como un objetivo indirecto alcanzar los volúmenes máximos de tanque en un instante prefijado, que puede ser al final del periodo tarifario más barato (a las 8).

Tanto la limitación del número de conmutaciones como el forzado de unos volúmenes determinados en un instante se pueden abordar modificando el índice de coste o añadiendo restricciones.

5.1. LIMITACIÓN DEL NÚMERO DE CONMUTACIONES

Si consideramos el número de conmutaciones como el número de cambios en $\delta[k]$ a lo largo del periodo de optimización, necesitamos una ecuación que exprese ese número de cambios como una función de la matriz Δ . De hecho, como los valores de δ en los periodos más largos son reales, el número de conmutaciones sólo puede aplicarse a los periodos más cortos donde δ es entero. Si se definen las siguientes matrices:

$$\mathbf{I}_N^+ = \begin{bmatrix} \underbrace{0 \cdots 0}_N & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \cdots & \ddots & 1 & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}_{(k_m-1)N \times k_m N}$$

$$\mathbf{I}_N^- = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & \underbrace{0 \cdots 0}_N \end{bmatrix}_{(k_m-1)N \times k_m N}$$

$$\mathbf{Y}_N = \mathbf{I}_N^+ - \mathbf{I}_N^-$$

El número de cambios en $\delta[k]$ durante los k_m periodos cortos se puede expresar como:

$$\text{sum}(\text{abs}(\mathbf{Y}_{N_c}[\delta_{ant}; \Delta(1 : (k_m - 1)N_c)])) \quad (25)$$

La expresión anterior tiene en cuenta como un posible cambio el primer valor de Δ si éste es distinto del último del periodo anterior. δ_{ant} no es una variable de decisión, sino un vector constante resultado de la optimización previa.

La primera alternativa para reducir el número de conmutaciones es incluir el número de cambios de δ en el índice de coste. En este caso, el problema

de optimización tendría las mismas restricciones que (24), y solo se modificaría el índice de coste:

$$J = J + \alpha_c \text{sum}(\text{abs}(Y_{N_c}[\delta_{ant}; \Delta(1 : (k_m - 1)N_c)])) \quad (26)$$

El factor de ponderación α_c debe escogerse con cuidado para lograr un compromiso entre la minimización del coste y el número de conmutaciones.

En lo que respecta a limitar el número de conmutaciones introduciendo restricciones, aunque es posible, no es efectivo en la práctica. Supongamos que la optimización se realiza cada 10 minutos, y se limita el número de conmutaciones a $c_{max} = 2$. Entonces, en el peor caso, existe la posibilidad de que las 2 conmutaciones siempre ocurran en los primeros 10 minutos, resultando en un total de $2 \times 6 \times 24 = 288$ conmutaciones en un día.

5.2. FORZADO DE VOLÚMENES

Por otra parte, con el fin de forzar que los volúmenes alcancen un valor máximo en un instante determinado, la primera alternativa es agregar un término al índice de coste, con un factor de ponderación. Se propone definir un valor k_v , como el entero que representa el instante discreto más cercano al instante de tiempo cuando se requieren los volúmenes máximos. Si llamamos t_i al tiempo inicial (en segundos) cuando se ejecuta la optimización, y t_v el momento en que se requieren los volúmenes máximos, el valor de k_v es

$$k_v = \begin{cases} \text{round}(\frac{t_v - t_i}{h}) & \text{if } t_v - t_i \leq k_m h \\ k_m + \text{round}(\frac{t_v - t_i - k_m h}{Lh}) & \text{if } t_v - t_i > k_m h \end{cases} \quad (27)$$

Con esto, el índice de coste quedaría como

$$J = J + \alpha_v \left(\hat{F}_O[k_v] - \mathbf{F}_{k_v} \Delta + 3600 \frac{V_{obj} - V(0)}{h} \right) \quad (28)$$

Donde α_v es un vector fila con el factor de ponderación para cada tanque, y V_{obj} es el vector de volúmenes que se alcanzará en el instante t_v .

El inconveniente del enfoque anterior es que el resultado es altamente dependiente del factor de ponderación α_v utilizado. La segunda alternativa consiste en agregar nuevas restricciones. La restricción a añadir para forzar que los volúmenes alcancen los valores requeridos en el tiempo especificado sería

$$\mathbf{F}_{k_v} \Delta \geq 3600 \frac{V_{obj} - V(0)}{h} + \hat{F}_O[k_v] \quad (29)$$

El inconveniente de este enfoque es que la restricción añadida puede provocar que el problema de optimización no sea factible. Esto puede pasar especialmente si el instante en que se ejecuta la optimización está cerca del instante en que se requieren los volúmenes máximos, es decir cuando k_v es pequeño.

5.3. PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN FINAL

Se plantean 2 alternativas para el problema de optimización final, dependiendo de si los volúmenes máximos están incluidos en el índice de coste o se formulan como restricciones.

Se define:

$$J_0 = \mathbf{T} \mathbf{P} \Delta \quad (30)$$

$$J_c = \alpha_c \text{sum}(\text{abs}(Y_{N_c}[\delta_{ant}; \Delta(1 : (k_m - 1)N_c)])) \quad (31)$$

$$J_v = \alpha_v \left(\hat{F}_O[k_v] - \mathbf{F}_{k_v} \Delta + 3600 \frac{V_{obj} - V(0)}{h} \right) \quad (32)$$

Con respecto a las restricciones, algunas son comunes a las dos alternativas:

$$\mathbf{F}_k \Delta \geq 3600 \frac{V_{min} - V(0)}{h} + \hat{F}_O[k], \quad k = 1, \dots, k_M$$

$$\mathbf{F}_k \Delta \leq 3600 \frac{V_{max} - V(0)}{h} + \hat{F}_O[k], \quad k = 1, \dots, k_M$$

$$\mathbf{F}_{k_M} \Delta \geq \hat{F}_O[k_M]$$

$$\mathbf{I}_k \Delta = 1, \quad k = 1, \dots, k_M$$

$$\Delta[j] \in \{0, 1\} \in \mathbf{N}, \quad j = 1, \dots, k_m N_c$$

$$\Delta[j] \in [0, 1] \in \mathbf{R} \quad j = k_m N_c + 1, \dots, k_M N_c \quad (33)$$

Mientras que la posible restricción adicional es:

$$C_v := \mathbf{F}_{k_v} \Delta \geq 3600 \frac{V_{obj} - V(0)}{h} + \hat{F}_O[k_v] \quad (34)$$

Con esto, los posibles problemas de optimización pueden resumirse como

1. Minimizar $J_0 + J_c$ sujeto a las restricciones comunes más C_v .
2. Minimizar $J_0 + J_c + J_v$ sujeto a las restricciones comunes.

Teniendo en cuenta las ventajas e inconvenientes, se propone utilizar el problema 1 para garantizar volúmenes máximos de los tanques en el momento especificado, pero cambiar al problema 2 en caso de que el problema 1 sea no factible.

6. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Se utilizará el ejemplo de aplicación descrito en la sección 3, obtenido de una instalación real de suministro de agua, para ilustrar el enfoque propuesto. Las tarifas de las tres bombas se muestran en la tabla 2. Para realizar los cálculos, el caudal de salida de los tanques se simula por medio de una serie de Fourier ajustada a partir de datos reales, a la que se agrega un término aleatorio filtrado para simular variaciones inciertas. Para la predicción del caudal de salida, se ha utilizado un

Cuadro 2: Tarifas de las tres bombas en el ejemplo de aplicación (en eur/kWh).

Periods	Pump 1	Pump 2	Pump 3
$0 < t < 480$	0.063	0.066	0.066
$480 < t < 540$	0.079	0.088	0.088
$540 < t < 600$	0.1	0.088	0.088
$600 < t < 900$	0.1	0.099	0.099
$900 < t < 960$	0.079	0.099	0.099
$960 < t < 1440$	0.079	0.088	0.088

algoritmo simple que predice para el día siguiente el mismo caudal horario medido en el día de hoy.

Los problemas de optimización final descritos en la sección 5.3 se han resuelto con Matlab, utilizando Yalmip como parser y el solver CBC.

Los volúmenes mínimos permitidos para los tanques son $V_{min} = [100; 100; 740]$ y los volúmenes máximos $V_{max} = [500; 500; 3700]$, en m^3 . Con el fin de controlar el sistema de bombeo, la optimización se realiza cada 10 minutos, con un horizonte de 24 horas, con un periodo corto de $h = 60$ segundos, con $k_m = 30$ y $k_M = 47$ (es decir $L = 30$). Sólo se aplican las 10 primeras órdenes de bombeo resultantes de la optimización.

En el instante $t_v = 480 \cdot 60$ segundos, es decir, al final del periodo más barato, se requiere que los volúmenes de los tanques sean cercanos a los máximos, $V_{obj} = [492; 492; 3640]$.

Se utiliza siempre el problema de optimización 1, donde los volúmenes en t_v son una restricción, y el número de conmutaciones se incluye en el índice de coste, con un factor de ponderación α_c , excepto cuando el problema no resulta factible, en que se resuelve el problema 2 en su lugar (con ambos términos en el índice de coste, con $\alpha_v = 0,001$).

La figura 2 muestra la evolución de los volúmenes de los tanques, los caudales de las bombas y el estado de las válvulas durante 3 días de simulación. En este caso, el número de conmutaciones no se considera (es decir, $\alpha_c = 0$). El resultado es un gran número de conmutaciones (más de 1000).

Las figuras 3, 4 y 5 muestran el resultado de la simulación para diferentes valores de α_c . Cuanto mayor es el valor de α_c , menor es el número de conmutaciones diario, pero mayor el coste ($n_{con} = 20$, $J = 54$ para $\alpha_c = 0,01$, $n_{con} = 12$, $J = 55$ para $\alpha_c = 0,1$, $n_{con} = 8$, $J = 59$ para $\alpha_c = 0,5$).

Observando la evolución de los volúmenes (mostrada como un porcentaje de su capacidad máxima), la simulación comienza a las 0 horas con los tres tanques en el centro de su rango. A las 8 no se pueden conseguir los volúmenes V_{obj} , pero después

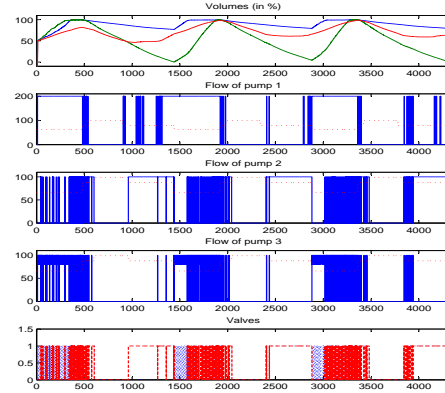


Figura 2: Resultados de la simulación para $\alpha_c = 0$. Volúmenes (en porcentaje), caudal de las bombas 1, 2 y 3, y estado de las válvulas.

de 24 horas, se llega a un gráfico de volumen casi periódico en el que sí se consiguen. Las figuras muestran los caudales de las bombas junto con el precio horario de la energía según la tarifa. Se observa que una vez que el patrón casi periódico se establece, las bombas nunca se ponen en marcha en los periodos tarifarios más caros.

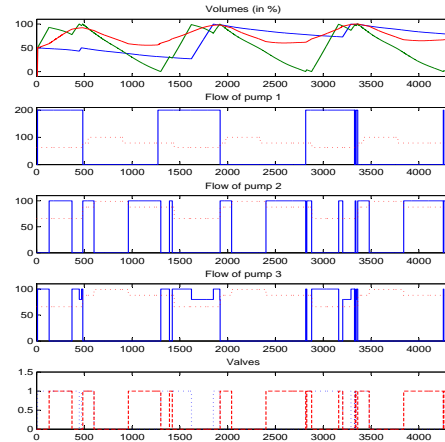


Figura 3: Resultados de la simulación para $\alpha_c = 0,01$. Volúmenes (en porcentaje), caudal de las bombas 1, 2 y 3, y estado de las válvulas.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha abordado la optimización de la operación de un sistema de bombeo de agua por medio de solvers estándar. El objetivo es determinar qué válvulas y bombas deben estar activas en cada instante de tiempo para minimizar el coste de operación, teniendo en cuenta los periodos de

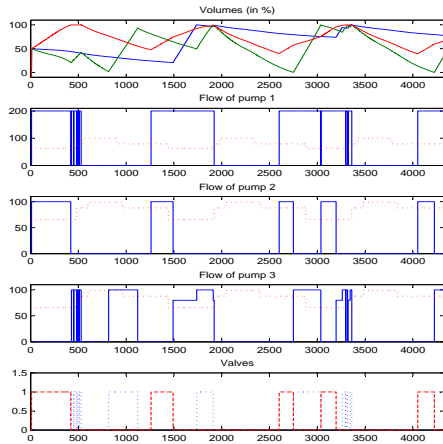


Figura 4: Resultados de la simulación para $\alpha_c = 0,1$. Volúmenes (en porcentaje), caudal de las bombas 1, 2 y 3, y estado de las válvulas.

tarificación. Las restricciones principales son los volúmenes máximo y mínimo de los tanques. Se propone un modelo matemático del problema con el fin de formular, en forma matricial, el índice de coste y las restricciones, para poder usar solvers estándar como CBC.

Se trata de un problema de optimización mixta entera, que tiene un coste computacional elevado. Para reducir el coste, teniendo en cuenta que la optimización se va a resolver cada poco tiempo, y que solo se van a aplicar los primeros valores obtenidos, se propone reducir el número de variables enteras, sustituyéndolas por variables reales a partir de un instante determinado en el horizonte de optimización. Se tiene en cuenta el número de conmutaciones en el índice de coste, ya que en caso contrario el número de conmutaciones resultante es muy elevado. Se analiza un ejemplo de un sistema de suministro de agua real, con 3 tanques, 3 bombas y 2 válvulas, para demostrar la validez del enfoque, utilizando Yalmip como parser y CBC como solver. La propuesta planteada permite resolver los problemas de optimización en pocos segundos en un ordenador personal de sobremesa.

Agradecimientos

Financiado por el proyecto TEC2015-69155-R del Ministerio de Economía y Competitividad.

Referencias

- [1] Bunn, S. and Reynolds, L. (2009). The energy-efficiency benefits of pump scheduling optimization for potable water supplies. *IBM Journal of Research and Development*, 53:5:1 - 5:13. DOI:10.1147/JRD.2009.5429018.

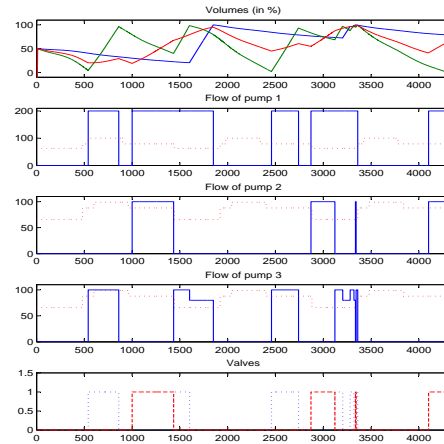


Figura 5: Resultados de la simulación para $\alpha_c = 0,5$. Volúmenes (en porcentaje), caudal de las bombas 1, 2 y 3, y estado de las válvulas.

- [2] Fang, H., Zhang, J., and liang Gao, J. (2010). Optimal operation of multi-storage tank multi-source system based on storage policy. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 11:571-579. DOI:10.1631/jzus.A0900784.
- [3] Ormsbee, L., Lingireddy, S., and Chase, D. (2009). Optimal Pump Scheduling For Water Distribution Systems. In *Proceedings of the 4th Multidisciplinary International Conference on Scheduling : Theory and Applications (MISTA 2009), 10-12 August 2009, Dublin, Ireland*, pages 341–356.
- [4] Ormsbee, L. E. and Lansey, K. E. (1994). OPTIMAL CONTROL OF WATER SUPPLY PUMPING SYSTEMS. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120:237–252. ISSN:0733-9496/94/0002- 0237.
- [5] Pasha, M. F. K. and Lansey, K. (2009). Optimal Pump Scheduling by Linear Programming. In *Proceedings of the 4th World Environmental and Water Resources Congress 2009 May 17-21, 2009 — Kansas City, Missouri, United States*, pages 341–356.
- [6] Powell, R. S. and McCormick, G. (2004). Derivation of NearOptimal Pump Schedules for Water Distribution by Simulated Annealing. *J. Operational Res. Soc.*, 55:728-736.
- [7] Sotelo, A., Lüken, C., and Barán, B. (2002). Multiobjective Evolutionary Algorithms in Pump Scheduling Optimization. In *Proceedings of the Third International Conference on Engineering Computational Technology, Stirling, Scotland.*, page 175-176.

DEVELOPMENT OF A GREY MODEL FOR A MEDIUM DENSITY FIBREBOARD DRYER IN ECOSIMPRO

Pedro Santos Bartolomé, José Luis Pitarch, César de Prada

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid.
C/ Real de Burgos s/n, 47011, Valladolid. pedro.santos.bartolome@uva.es, {jose.pitarch | prada} @autom.uva.es

Summary

This work contains the design and testing of a grey-box model based on first principles for the drying section of a Medium Density Fiberboard (MDF) manufacturing plant for use in a Model-Predictive Controller (MPC). The fitting of the model to experimental data has been solved with the data reconciliation technique, and the model has then been implemented and tested in simulation for proper behavior. Due to lack of information in a number of relevant process values, as well as low trustworthiness of some measurements, state and disturbance estimators have been determined as necessary to include in the final MPC control schema.

Keywords: MDF, Data reconciliation, Grey model.

1 INTRODUCTION

Medium density fiberboard (MDF) is a wood-based panel manufactured from lignocellulosic fibres by the “drying process”, i.e. having low fibre moisture content at the forming stage and being essentially produced under heat and pressure with the addition of an adhesive [1].

The raw material is chipped and softened by pre-heating in a low-pressure steam boiler, after which it is fed to grinding disks and mixed with adhesive and wax. The mixed product is dried to guarantee low humidity, after which processes of compression, cutting, and heat application are applied to achieve the desired panel properties.

MDF is cheaper than raw wood, more stable, provides a smooth surface for painting, has good machinability and high strength, and is available in larger sizes. Because of this, it is a very popular product that continues to rise in demand, mainly for furniture applications.

Because of the hard requisite of humidity levels, accurate control of the process becomes a necessity. Linear SISO control schemes such as PID loops with decoupling have been usually employed for such a task. However, these controllers do not achieve an acceptable performance during (inevitable) transients due to the nonlinearity and delay of the process. Hence, a nonlinear Model-Predictive Controller (MPC) is considered as more suitable for implementation in one

such industry, with this paper concerning the first part of the design: the development of the model.

The proposed model is a grey-box one based in well-known physical relationships between variables, such as mass and energy balances, as well as experimental relationships based on data available, and unknown parameters and variables that will be estimated.

Data reconciliation is used for fitting the model to available experimental data of the plant. Implementation of this task uses the software CasADi [2] in the MATLAB® environment, a modern framework for numerical optimization including automatic differentiation. For analysis of the coherence of the model and final results, the simulation tool EcosimPro® [3] is used.

The paper organizes as follows. Next, a general description of the plant to be modeled. The first principles model is summarized in 3. Then, the customization with experimental data using data reconciliation is formally stated in 4, along with simplifications and experimental equations included in the model. The consistency of the final model and fitness to the data are studied in 5. Finally, a summary of the work together with indications for the next steps in building the controller are given in the last section.

2 PLANT DESCRIPTION

In an industrial MDF wood chips are pretreated as described in the previous section. Due to the low quantity of the additives added to the fiber, that will not significantly impact mass or energy balances, as well as to the inability to obtain useful fiber parameters (width, length, etc.) from the available measurements, this pretreatment has not been explicitly considered in the model. The final mixture of steam, wood chips and additives flows through a steel tube dryer, which is thermally isolated from the environment with a protecting cover of mineral wool.

The air used for drying is procured through an attached fan, and it is a mixture of hot air coming from a heat recovery system, and cold air coming from the environment, both flows meeting in a mixture chamber. The flow of hot and cold air is regulated by the opening of two flaps located on the air paths from the heat

recovery and the environment respectively. Both temperature and pressure are known for the hot air inlet and the environment, as well as environmental relative humidity. Air temperatures at inlet and outlet of the tube dryer are also measured.

Once the mixture of air, fibers and additives leaves the tube, it enters a cyclone stage for separation, after which the humidity of the remaining fiber is measured.

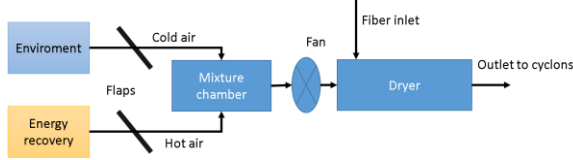


Figure 1: Schematic of the plant.

The final humidity of the wood fiber leaving the dryer is the key indicator of this section of the process, as it greatly impacts the performance of the MDF produced. Therefore the controllers implemented for the plant have to be evaluated by their ability to keep this variable within optimal range during stationary operation and for their reliability to return to these values after large perturbations to the process and product changeovers.

The usual control setup consists of SISO PID control loops controlling important variables such as humidity or temperature by regulating the control variables: percentage of opening of cold and hot air flaps.

This control schema presents several issues, as the process is nonlinear and the involved variables are strongly coupled. Hence, linear SISO controllers are not able to precisely return to their references when a small disturbance arises (operators might be even forced to manually control the process), which, in turn, reduces the quality of the final product.

These circumstances favor the use of a more complex controller capable of predicting these interactions and reacting to changes in the operation with acceptable performance. For this reason a grey model based on first principles is to be developed, with the implementation of a MPC as a final aim.

3 FIRST-PRINCIPLES MODEL

Detailed models of MDF dryers can be found in literature [4], [5]. However, these models involve solving partial differential equations (PDE), which are computationally expensive for online control and optimization purposes. Moreover, the usual residence time of the fibers inside the dryer tube is usually less than the sampling time of data acquisition industrial systems.

Therefore, under the above assumptions, we propose a reduced model for control purposes which avoids the

inclusion of partial-differential equations, reducing thus the computational cost significantly in further simulation and optimization stages.

The model is started by formulating the energy and mass balances in the air mixture chamber:

$$F_{in} = F_{amb} + F_{hot} \quad (1)$$

$$F_{in} \cdot H(T_{in}, W_{in}) = F_{amb} \cdot H(T_{amb}, W_{amb}) + F_{hot} \cdot H(T_{hot}, W_{hot}) \quad (2)$$

Where F represents humid air flows in kg/s, H is the specific enthalpy function in J/kg, dependent on the temperature T in °C and the specific humidity W (mass of water relative to total air mass) with the formula [6]:

$$H(T, W) = 1.006 \cdot T + W(2490 + 1.86 \cdot T) \quad (3)$$

This is followed along with the mass and energy balances of the tube dryer:

$$F_{in} + E = F_{out} \quad (4)$$

$$q_f \cdot X_0 = E + q_f \cdot X \quad (5)$$

$$F_{in} \cdot H(T_{in}, W_{in}) + E \cdot H_w = F_{out} \cdot H(T_{out}, W_{out}) + C_{pf} \cdot q_f \cdot (T_{fin} - T_{fout}) + Q_T \quad (6)$$

Where E is the mass flow of water evaporated in kg/s, q_f is the fiber mass flow in kg/s, X_0 is the inlet humidity of the fiber, X is the outlet humidity of the fiber, H_w is the enthalpy of water at inlet conditions, C_{pf} is the calorific power of the wood fiber, and Q_T is the heat loss to the ambient, calculated with the equation:

$$Q_T = \Delta T_M \cdot A \cdot u \quad (7)$$

Where u is the heat transport coefficient, A is the area, and ΔT_M is the average temperature difference between the air and the tube.

It has been shown [4] that the temperature profile in a tube dryer is such that the temperature quickly descends at the entrance. From this follows that the outlet temperature will be dominant to characterize the heat loss to the environment, and so it has been considered exclusively for the lumped temperature difference:

$$\Delta T_M = T_{out} - T_t \quad (8)$$

Where T_t is the mean temperature of the tube whose evolution is calculated with the differential equation:

$$\begin{aligned} (m_t C_{pt} + m_l C_{pl}) \dot{T}_t &= \Delta T_M \cdot A \cdot u \\ &- \frac{(T_t - T_l) A_e k}{e_l + e_t} \end{aligned} \quad (9)$$

Where T_l is the temperature of the mineral wood isolation, dependent on the heat loss through the tube wall to the environment:

$$\frac{(T_t - T_l)A_e k}{e_w + e_t} = (T_l - T_{amb})A_e u_e \quad (10)$$

Where e_w and e_t are the width of the mineral wool and the dryer tube, respectively.

Finally, the evolution of the humidity of the fiber leaving the cyclones X_f is obtained after a mixture in these cyclones:

$$\tau \cdot \dot{X}_f = X(t - t_d) - X_f \quad (11)$$

Where τ is the time constant of the cyclones and t_d is the delay from the fiber entering the dryer until leaving the cyclones.

4 MODEL CUSTOMIZATION

The first-principles model designed would be for valid for any MDF installation with similar structure. After this initial framework, it becomes necessary to further complete the model for the specific TAFIBRA plant, with knowledge available from recorded measurements.

From all variables considered in the above model, measurements are only available for the following:

- Properties of ambient air: T_{amb} , W_{amb} , P_{amb}
- Properties of hot air: T_{hot} , P_{hot}
- Temperature of air at inlet and outlet of the dryer: T_{in} , T_{out}
- Flow and humidity of fiber leaving the cyclones: q_f , X_f

The following assumptions are made:

1. The relative humidity of the hot air is assumed to be the same as the ambient with no delay. Which along the mass balance of water in the mixture chamber shows:

$$W_{hot} = W_{in} = W_{amb}$$

2. Air and fiber at the outlet are assumed to be in thermal equilibrium

$$T_{f out} = T_{out}$$

3. Inlet temperature $T_{f in}$ of fiber is assumed to be around 100°C, as it is boiled before entering the dryer.
4. Inlet humidity of wood fiber X_0 is assumed to be constant. Inlet humidity will evolve slowly with

time as the fiber is mixed before entering the dryer.

At this point, the model still has more degrees of freedom than boundary variables, i.e. the manipulated and ambient variables are insufficient to fully determine the system. Thus, in order to fully determine the system, an analysis of the available data has to be conducted with the following goals:

1. Find an experimental relationship between the flow of air and the controlled variables: open percentage of the flaps.
2. Find an experimental formula to adjust the kinetics of water evaporation.
3. Achieve an acceptable fitness of the model to the experimental data.

In order to test the validity of proposed equations (1)-(11), as well as to adjust unknown parameters of the model, a data reconciliation problem has been performed with experimental data.

4.1 DATA RECONCILIATION

Data reconciliation (DR) is a technique used to obtain values for all process variables according to a model. It relies on the concept of redundancy (duplicated sensors or algebraic constraints) to correct the (possible noisy or faulty) measurements in order to satisfy the process constraints (physical laws) [7]. This step avoids the inclusion of corrupted data (outliers) in further steps, serves as a detector of systematic errors in sensors/process and, possibly, as a parameter estimator.

The fair function estimator [8] is used here as a robust objective function J against measurement outliers and gross errors. Thus, the DR reads:

$$\min_{\theta} J(\hat{\theta}, \theta) = \sum_{i=1}^r c^2 \cdot \left(\frac{|\epsilon_i|}{c} - \log \left(1 + \frac{|\epsilon_i|}{c} \right) \right) \quad (12)$$

$$\underline{\theta} \leq \hat{\theta} \leq \bar{\theta}; \quad h(\hat{\theta}) = 0$$

Where the i -th error ϵ is calculated as $\epsilon_i = (\hat{\theta}_i - \theta_i)/\sigma_i$, θ are the available process measurements, $\hat{\theta}$ are their estimated values limited between user-defined minimum and maximum values, r is the number of measurements available, $c \in \mathbb{R}^+$ is an user-defined fitting parameter to tune the slope for large residues, and $h(\hat{\theta})$ are the physical restrictions, i.e., equations (1)-(11). Note that, in DR, all model variables are considered as decision variables for the optimizer, with no distinction between input and output.

The optimization problem has been designed and resolved in MATLAB with CasADi [2]. The model is

discretized in time via orthogonal collocation to avoid the use of slow numerical integrators to compute the evolution of state variables. Moreover, the cost function $J(\hat{\theta}, \theta)$ is modified to include a penalty for high changes in the algebraic variables between collocation points and a further penalty for changes in the initial and final tube temperature for data sets recorded in stationary operation¹.

4.2 EXPERIMENTAL EQUATIONS

By testing different equations within the data reconciliation problem, the flaps were found to be accurately represented with a relationship between flow and pressure of the form:

$$F = K_v \cdot (0.4 \cdot a + 0.6 \cdot a^3) \cdot \sqrt{P_1^2 - P_2^2} \quad (13)$$

Where P_1 is the pressure at the inlet of the flap, and P_2 the pressure at the outlet. $P_1 = P_{hot} + P_{amb}$ is considered for the flow of hot air F_{hot} , whereas $P_1 = P_{amb}$ for the flow of ambient air F_{amb} . As both flaps provide the air flows to the mixture chamber, P_2 is equal to the pressure of the mixture chamber P_m (unmeasured) for both.

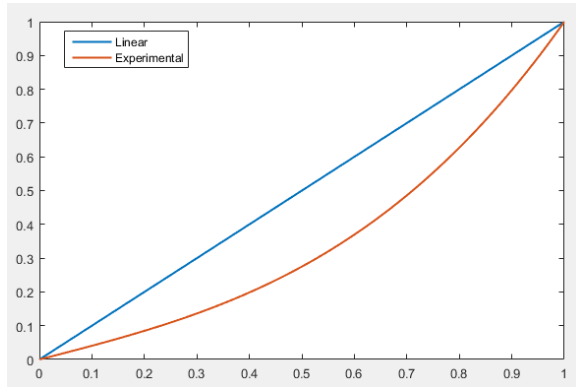


Figure 2: Fraction of flow through flaps as a function of opening signal (blue – linear, red – fitted).

As the outlet of the dryer is at atmospheric pressure, which is measured, the pressure of the mixture can be determined by knowing the pressure increase provided by the fan at the dryer inlet, and the pressure drop due to the friction of the flow through the dryer:

$$P_m + \Delta P_{fan} + \Delta P_{loss} = P_{amb} \quad (14)$$

The curve determining pressure increase provided by the fan depending on the flow is available from the supplier, and can be accurately fitted with the following quadratic equation (for units of the SI):

$$\Delta P_{fan} = -0.198 \cdot \left(\frac{F_a}{\rho_{air}}\right)^2 - 18.9 \cdot \frac{F_a}{\rho_{air}} + 6.98 \cdot 10^3 \quad (15)$$

¹ Note that the tube temperature is not measured.

The pressure loss due to friction in the dryer is estimated by the formula:

$$-\Delta P_{loss} = fr \cdot L \cdot D_t \cdot \left(\frac{4 \cdot F_a}{\pi \cdot D_t^2 \cdot \rho_{air}}\right)^2 \quad (16)$$

Where fr is an experimental friction factor.

The development of mathematical models describing moisture movement in wood is a complex mathematical task [9]. In the case of fiber drying, because of the previous chipping of the raw material, complexity is greatly reduced. This benefits the endeavor, as complex mathematical models would make on-line computation unfeasible.

It has been shown experimentally [4] that the speed of water evaporation in a MDF dryer is related to the difference between the dry bulb and wet bulb air temperatures. This relationship varies through the drying process and is affected by unavailable parameters such as fiber diameter, length and initial humidity.

According to the aim of using the model in an online controller, numerical integration of the spatial profiles of variables in the dryer (solving partial differential equations) is discarded for having higher computational cost. Therefore, a simplified experimental equation is looked for fitting the data as much as possible.

A linear relationship between the difference between the dry bulb and wet bulb temperature of the air at the outlet has been found to predict the outlet humidity accurately within the ranges of operation:

$$X = \gamma_1 - \gamma_2 \cdot (T_{out} - T_{wb}) \quad (17)$$

Where γ_1 and γ_2 are experimental parameters found by fitting the available data, and T_{wb} is the wet bulb temperature calculated from the outlet temperature and relative humidity [10].

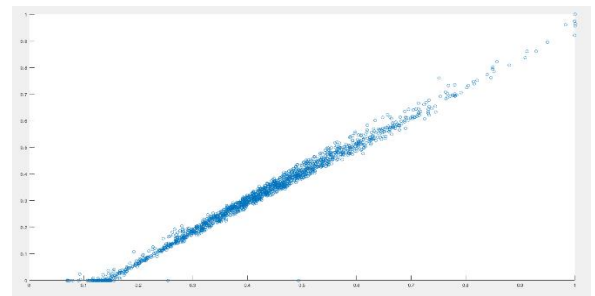


Figure 3: γ_1 vs γ_2 fitted for a range of experimental data.

The analysis of the relationship between γ_1 and γ_2 shows a linear dependency, as seen in Figure 3, but no measured process variable is found to influence their

value, linking them to unmeasured variables such as fiber geometry.

Further analysis of the DR results shows the pressure of the hot air inlet as the less trusted measurement for the fitting of the model, as seen in Figure 4 and Figure 5, where it can be compared to other input and output variables. As previously said, the data reconciliation makes no distinction between input and output variables, instead using all of them as decision factors to fit the model to the results.

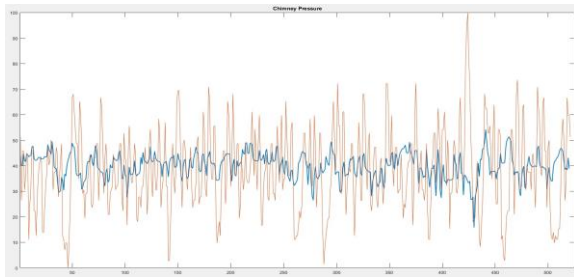
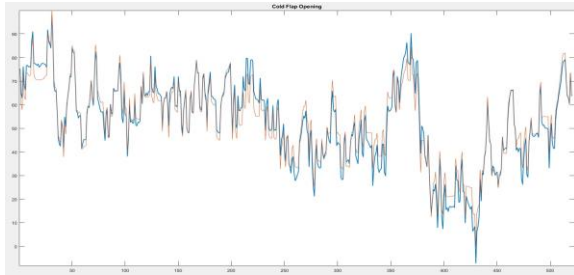


Figure 4: inputs vs fit – up: Ambient Flap, down: Inlet Pressure (red – measurement, blue – reconciled).

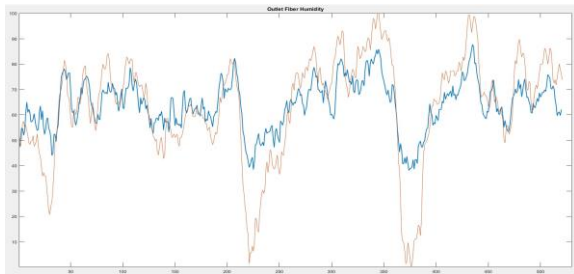
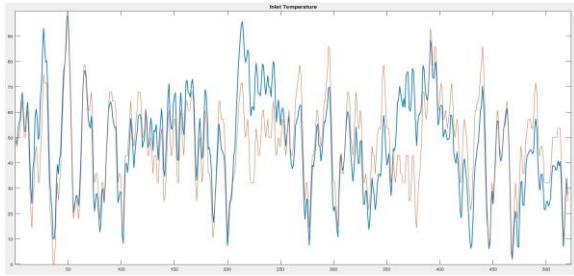


Figure 5: outputs vs fit – up: Inlet Temperature, down: Outlet Fiber Humidity (red – measurement, blue – reconciled).

5 MODEL VALIDATION

Once the model has been closed, i.e. it has as many degrees of freedom as physical boundary variables, the complete model is coded in ECOSIMPRO® [3], a simulation tool for 0D and 1D continuous-discrete systems.

The use of a simulation tool allows for testing of the coherence of the reactions of the model to changes, as well as to analyze the fitness of the model for wide ranges of historic data not included in the DR in the previous section.

5.1 COHERENCE TEST

The first purpose for this simulation is to test the model coherence in different usual situations. Especially for the opening of the flaps, as these are to be the controlled variables by the MPC: if the model predictions to these manipulations are incoherent, the behavior of the controller would be severely compromised.

As shown in Figure 6 and Figure 7 the test for the opening of the flaps shows physically consistent behavior: When increasing the signal to the flap controlling hot air, the volumetric flow of total air increases, as well as the inlet and outlet temperature, whereas outlet fiber humidity decreases. Reverse results for temperatures and outlet fiber humidity are shown when opening of the flap regulating the flow of the ambient air, but the flow of total air is increased as well.

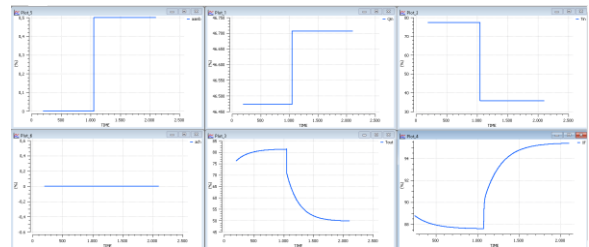


Figure 6: Reaction for increase in open signal of ambient flap. Charts show, from left to right and top to bottom: a_{amb} , Q_{in} , T_{in} , a_{ch} , T_{out} , X_f .

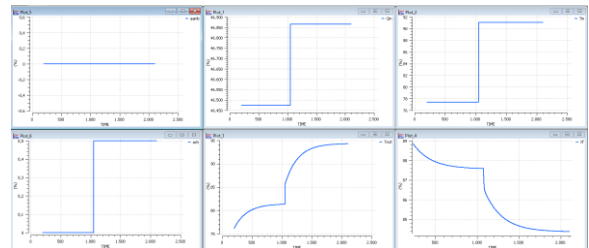


Figure 7: Reactions for increase in open signal of hot air flap. Charts as in Figure 6.

Consistent results are also obtained by testing the other inlet variables such as hot air pressure, atmospheric pressure, inlet humidity or fiber flow. Different values in parameters such as the friction factor and γ_1 and γ_2 are also tested, as the MPC will be implemented with moving horizon estimation to adapt the values of these parameters to fit recent measurements.

5.2 MODEL PREDICTION

After testing consistency, the model with estimated parameters is contrasted with experimental data. The model is shown to consistently produce higher noise in the prediction of inlet air, as shown in Figure 8. This effect is produced because of the high variation and delay of the hot air pressure sensor, which was initially filtered by DR in the model customization phase.

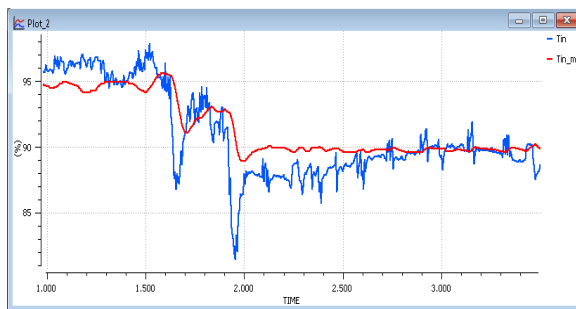


Figure 8: inlet temperature T_{in}^2 vs time (s). (red - measurement, blue - model).

Both outlet temperature and outlet humidity (linearly related by (17)) show noise inherited from the inlet temperature, as well as due to the influence of the hot air pressure on air flow.

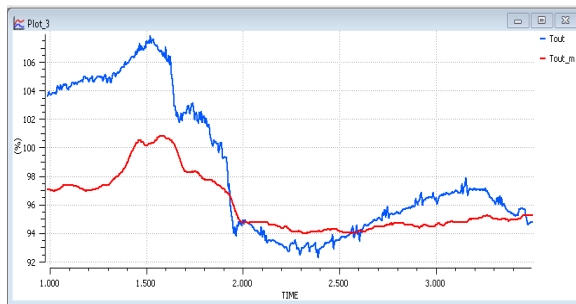


Figure 9: outlet temperature T_{out}^2 vs time (s). (red - measurement, blue - model).

Significant differences between predictions and measurements are also present in data ranges, which can be attributed to changes in inlet humidity, or in the fitted parameters.

² Values have been escalated due to confidentiality reasons

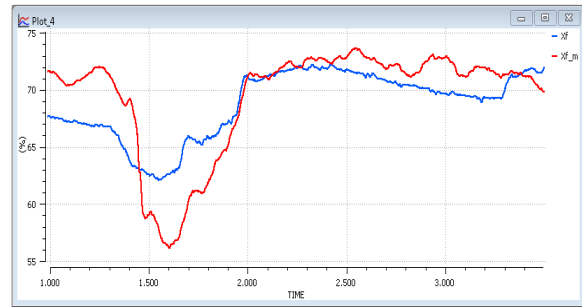


Figure 10: outlet fiber humidity X_f^2 vs time (s). (red - measurement, blue - model).

6 CONCLUSIONS

In this work, a modelling challenge for a medium density fiberboard dryer has been addressed to an acceptable level, for further use in a Model-Predictive Controller.

Due to the limited availability of process measurements, as well as the complexity of drying dynamics, a grey-box approach has been chosen. Parameters and unknown relationships between variables have been experimentally identified through data reconciliation, but this has been shown to not provide sufficiently accurate predictions. Therefore, moving horizon parameter estimation (MHE) will be required online to continuously adjust the model to actual operation. This is expected to increase significantly the consistency of the predictions. Moreover, it has also been shown that one of the sensors (that of the hot air pressure) provides untrustworthy information.

Future work planned for the project consists of the implementation of the online MHE and MPC. This controller will be first tested with the currently implemented model, analyzing its robustness against changes in the model representing possible regions of operation that are not well fitted.

Acknowledgements

This research is funded by the Spanish Government MINECO/FEDER DPI2015-70975-P.

References

- [1] "European Panel Federation," [Online]. Available: europanel.org/products--producers/products/mdf.
- [2] J. Andersson, J. Åkesson and M. Diehl, "CasADi -- A symbolic package for automatic differentiation and optimal control," in *Recent*

- Advances in Algorithmic Differentiation*, Springer, 2012, pp. 297-307.
- [3] "EcosimPro. Dynamic Modeling & Simulation Tool," [Online]. Available: www.ecosimpro.com.
 - [4] S. Pang, "Mathematical Modelling of MDF Fibre Drying: Drying Optimisation," *Drying Technology*, vol. 18, no. 7, pp. 1433-1448, 2000.
 - [5] O. Melander and A. Rasmuson, "Mathematical Modeling of Heat, Mass, and Momentum Transport in MDF Fiber Drying," *Drying Technology*, vol. 29, no. 1, pp. 64-72, 2010.
 - [6] P. Tsilingris, "Thermophysical and transport properties of humid air at temperature range between 0 and 100°C," *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, no. 5, pp. 1098-1110, 2008.
 - [7] L. M., T. Edgar and L. Lasdon, "Efficient data reconciliation and estimation for dynamic processes using nonlinear programming techniques.," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 16, no. 10-11, pp. 963-986, 1992.
 - [8] P. Huber, "Robust statistics," in *International Encyclopedia of Statistical Science*, M. Lovric, Ed., Springer Berlin, 2014, pp. 1248-1251.
 - [9] R. Čiegis and V. Starikovičius, "Mathematical modeling of wood drying process," *Mathematical Modelling and Analysis*, vol. 7, no. 2, pp. 177-190, 2002.
 - [10] R. Stull, "Wet-Bulb Temperature from Relative Humidity and Air Temperature," *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 50, no. 11, pp. 2267-2269, 2011.

DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE FALLOS MEDIANTE MONITORIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LAS FECHAS DE LIMPIEZA PARA INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS

J. Segarra-Tamarit, E. Pérez, H. Beltrán, E. Belenguer¹ y J.Gandía²

¹DESID, Universitat Jaume I, Castelló de la Plana, España, pereze@uji.es

²Greenpower Partners

Resumen

Este trabajo presenta una propuesta para mejorar la automatización del mantenimiento de plantas fotovoltaicas. Esto se lleva a cabo, por una parte, seleccionando los índices adecuados para la detección de fallos utilizando los datos de monitorización disponibles. Por otra parte, se estudia el efecto de la suciedad en los paneles y se plantea un método para optimizar las fechas y frecuencia de limpieza de las instalaciones.

Palabras clave: Fotovoltaica, detección de fallos, optimización, limpieza de instalaciones.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las energías renovables se han afianzado a nivel mundial. En 2016 se instalaron 161 GW, superándose los valores de años anteriores y alcanzando un total de 2006 GW [1].

Aunque hay un estancamiento de la construcción de nuevos proyectos en Europa, a nivel mundial la energía fotovoltaica ha seguido creciendo gracias en gran medida a China, Japón y a países en desarrollo [2]. Debido a que se realizan menos instalaciones nuevas, el sector en Europa se está especializando en ingeniería, estudios técnicos, administración de activos y operación y mantenimiento [3].

Entre las ventajas de la energía fotovoltaica se encuentra que, gracias a su carácter modular, se pueden construir instalaciones en prácticamente cualquier lugar y de una gran variedad de potencias. Esto permite que existan desde pequeñas instalaciones para el autoconsumo, o integradas arquitectónicamente, hasta centrales de gran potencia. Además, su vida útil es superior a los 20 años y, con un buen mantenimiento, se puede prolongar hasta los 40 años en algunos casos [4].

En este trabajo se pretende mejorar dos aspectos fundamentales del mantenimiento de instalaciones fotovoltaicas como son la detección automática de fallos mediante los datos de monitorización y la optimización de las fechas de limpieza. Para ello,

en la sección 2 se describen los componentes principales de una instalación, su funcionamiento y los fallos asociados a cada uno de ellos. En la sección 3, se analizan los dos índices utilizados para la detección de fallos, así como algunas de sus limitaciones debidas a la variabilidad o la presencia de sombras sobre algunos paneles. En la sección 4 se define una función de coste para minimizar las pérdidas debidas al efecto de la suciedad. Finalmente, en las secciones 5 y 6 se muestran resultados obtenidos tanto en la detección de fallos en instalaciones reales como en la optimización, y se ofrecen algunas conclusiones.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las instalaciones fotovoltaicas están compuestas por paneles solares, que se conectan en serie para aumentar la tensión hasta los valores de entrada del inversor. Las series de paneles pueden estar montadas directamente sobre una cubierta o sobre estructuras de soporte que les dan la inclinación deseada para captar mejor la radiación solar. Estas estructuras soportan una o varias series de paneles sobre ellas y están espaciadas entre sí para intentar evitar que se hagan sombras entre ellas.

Las series se conectan en paralelo para que la corriente también tenga valores manejables por el inversor. Esto se hace en cajas de conexiones, que contienen además protecciones para cada una de las series que llegan. Es frecuente que en centrales fotovoltaicas haya varios niveles de cajas. En un primer nivel se unen las series y en el segundo se unen las salidas de las cajas anteriores para poder conectarlas al inversor. Dependiendo de la instalación puede haber instrumentos de monitorización instalados en las cajas que permitan conocer la corriente de cada serie en tiempo real. Con este nivel de monitorización es sencillo detectar el fallo de una serie, ya que solamente hay que comprobar si la serie está generando corriente o no.

Por último, se encuentran los inversores. Estos transforman la corriente continua en alterna y ge-

neralmente tienen monitorizadas todas sus variables de funcionamiento. Además, si se trata de una central conectada a la red que requiere aumentar la tensión, también se requiere un centro de transformación.

En una central fotovoltaica se pueden producir fallos de varios tipos. Uno relativamente común que hay que controlar es que no se desconecten o rompan los terminales que unen los paneles y que las protecciones de las cajas (normalmente fusibles) no se hayan desconectado. Estos fallos son difíciles de detectar a través de la monitorización a nivel de inversor porque la instalación sigue funcionando pese al defecto, aunque produciendo una potencia menor.

Otro de los posibles puntos de fallo son los inversores. Cuando falla uno, se pierde la producción de toda la parte de la instalación que está conectada a él. Este tipo de fallo es más fácil de detectar, ya que supone un cambio grande en la evolución de la potencia inyectada por la planta.

Otro aspecto importante en relación al mantenimiento de las instalaciones fotovoltaicas es que, como los paneles están en el exterior, se van ensuciando con el paso del tiempo y para evitar la pérdida de producción que ello implica es habitual que se limpien los paneles al menos una vez al año. Esta limpieza es conveniente hacerla en el momento óptimo del año para obtener un mayor impacto en los beneficios.

3. DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE FALLOS MEDIANTE ÍNDICES DE RENDIMIENTO

3.1. Performance Ratio

Uno de los índices más utilizados para comprobar el funcionamiento de instalaciones fotovoltaicas es el *Performance Ratio* (PR), que compara la energía producida por la instalación (E) en un periodo determinado con la que podría producir de manera teórica (E_{teo}) en ese mismo periodo.

$$PR = \frac{E}{E_{teo}} \quad (1)$$

Para calcular (E_{teo}), el primer paso es obtener la potencia teórica (P_{teo}) en cada instante de tiempo, utilizando la irradiancia medida por los piranómetros de la instalación.

$$P_{teo}(t) = \frac{Irradiancia(t)}{1000} P_p \quad (2)$$

Dónde P_p es la potencia pico de la instalación. La energía teórica se obtiene integrando la potencia durante el periodo deseado (T).

$$E_{teo} = \int_0^T P_{teo}(t) dt \quad (3)$$

El PR se puede calcular diariamente para comprobar el rendimiento de la instalación. Sin embargo, este índice presenta variaciones a lo largo del año de hasta un 20 % debido, entre otros factores, a la suciedad acumulada en los paneles o las pérdidas de rendimiento por temperatura [5]. Además, en un mismo mes también puede variar cerca de un 10 % de unos días a otros.

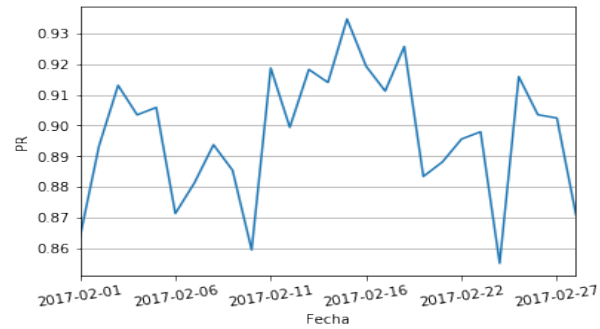


Figura 1: Variaciones del PR durante un mes

Pese a estas variaciones, el PR se suele calcular diariamente para detectar fallos importantes como que se desconecte un inversor. Por ejemplo, la Figura 1 muestra la evolución del PR a lo largo de un mes de funcionamiento normal. Se puede entender que, a pesar de las variaciones habituales, si el PR bajara de 0.8 estaría relacionado con algún defecto en la instalación.

La ventaja del PR es que se puede calcular midiendo únicamente la energía producida y la irradiancia.

3.2. Ratio específico

Para poder detectar fallos más concretos, como la rotura de un conector o de una protección que desconecte una serie de paneles o una caja, se divide la instalación en partes de las que se puedan obtener medidas. Esto va desde hacer un grupo por cada inversor de la instalación, hasta dividirla por cajas, dependiendo de las características de cada una.

Es frecuente que los diferentes grupos no tengan la misma potencia, por lo que para poder compararlos se calcula el ratio específico (RE), que se mide en horas de producción u horas solares pico

(*HSP*). Esto consiste en dividir la energía producida por cada grupo en el periodo para el que se va a hacer la comparación, por su potencia pico.

$$RE_{grupo} = \frac{E_{grupo}}{P_{grupo}} \quad (4)$$

Una vez se conoce el valor de *RE* de cada grupo, para compararlos de manera mas sencilla, se dividen todos por el mayor de ellos, que es la zona de la instalación que mejor está funcionando.

$$R_{grupo} = \frac{RE_{grupo}}{RE_{max}} \quad (5)$$

Así, se obtienen valores de ratio (*R*) entre cero y uno que representan el rendimiento de los diferentes grupos. Estos valores se pueden relacionar con la potencia de las partes que componen cada grupo. Por ejemplo, si uno tiene un ratio de 0.94 y está formado por 17 series (una serie es el 5.8 % de la potencia total), se puede determinar que está fallando una serie de esa parte del parque.

En este cálculo se está asumiendo que la zona que tiene el ratio específico más alto no tiene ningún defecto. Esto no supone un problema grave, ya que en el momento en el que se reparase algún fallo en cualquier otra parte, la parte reparada pasaría a ser la de mayor *R* y se detectaría el fallo en la zona que antes se suponía en buen estado.

3.3. Sombras

Es posible que algún elemento de los alrededores de la instalación, como un árbol o un muro de los alrededores del recinto, provoque sombras en algunas zonas. Este efecto es más frecuente en los meses de invierno, ya que el sol tiene menos elevación. Si las sombras afectan a una parte de la instalación y a otras no, o no afectan por igual, se podría detectar falsos fallos utilizando los índices anteriores. Por esto es importante identificar la presencia de sombras y descartar del cálculo de los indicadores de rendimiento las horas durante las que afectan dichas sombras.

En la Figura 2 se representa la intensidad producida por tres series de paneles de una instalación. Se puede apreciar que la serie afectada por sombras de la estructura de soporte que tiene delante produce corrientes más bajas durante las primeras y últimas horas del día, cuando el sol está más bajo. En cambio, el resto del día funciona correctamente. Por otra parte, se representa una serie afectada por un bosque cercano. Por la mañana las sombras son mayores, por lo que la producción

es muy baja, mientras que el resto del día produce más corriente pero sigue afectada.

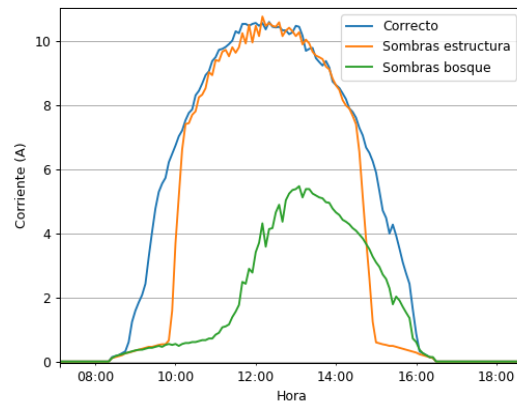


Figura 2: Corrientes de series con sombras

El efecto de las sombras también es visible a nivel de inversor. En la Figura 3 se muestra como el inversor 1 tiene menos producción entre las 8:00 y las 10:30 debido a las sombras.

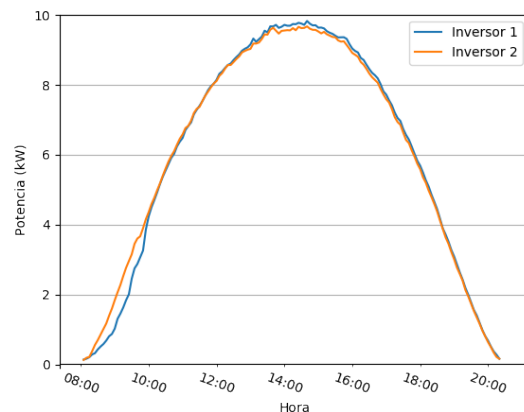


Figura 3: Potencia de inversor con sombras

Como la altura del sol es menor durante los meses de invierno, en ocasiones las sombras solo afectan durante esa época del año y desaparecen en los meses más próximos al verano. También es posible que el efecto de las sombras persista durante todo el año. En ambos casos es interesante detectar en qué época del año empieza a suceder el fenómeno o si afectan durante la mayor parte del día a lo largo del invierno, para poder descartar las horas de sombras de los cálculos o tener en cuenta a qué porcentaje de la zona de estudio afectan para descontarlo de la potencia total.

4. OPTIMIZACIÓN DE LAS LIMPIEZAS

El primer paso para averiguar cuándo es conveniente limpiar una instalación es definir una función que describa cómo se reduce el rendimiento de los paneles con el paso del tiempo. Para ello, se define $L(d)$ como las pérdidas de rendimiento de los paneles por cada día que pasa desde la última limpieza.

$$L(d) = K \cdot d \quad (6)$$

Dónde K son las pérdidas de rendimiento diarias. En [6] y [7] se estudia este efecto de la suciedad sobre el rendimiento, obteniéndose unos valores de K de alrededor de un 0.26 %, que es el valor que se va a utilizar.

Por otra parte, para realizar un análisis más completo, debe considerarse que las lluvias tienen un efecto limpiador en los paneles. Por ello, en verano se alcanzan las mayores pérdidas, al encadenarse más días sin llover.

Para introducir este factor en el estudio, se define la probabilidad de que llueva en un día determinado como $q(t)$ y, por tanto, la de que no llueva como $p(t) = 1 - q(t)$. A continuación, para un día cualquiera en el que se llevan d días desde la última limpieza, se pueden definir las pérdidas de rendimiento esperadas t días después como:

$$LE(t, d) = \mathbb{E}(L(t)) \quad (7)$$

Donde \mathbb{E} representa la esperanza matemática.

Para calcular esta cantidad puede deducirse que, cuando ha pasado un día, el valor de L será 0, si ese día llueve, o $K \cdot (d+1)$ si no. Es decir, el valor esperado será:

$$\begin{aligned} LE(1, d) &= q(1) \cdot 0 + p(1) \cdot (K \cdot (d+1)) = \\ &= p(1) \cdot (K \cdot (d+1)) \end{aligned} \quad (8)$$

Análogamente, para dos días el valor de L será 0 si llueve ese mismo día, $K \cdot 1$ si llueve el día anterior o $K \cdot (d+2)$ si no llueve ninguno de los dos días. Por tanto se tiene:

$$\begin{aligned} LE(2, d) &= p(2) \cdot (q(1) \cdot K + p(1) \cdot K \cdot (d+2)) \\ LE(2, d) &= p(2) \cdot (q(1) \cdot K + p(1) \cdot K \cdot (1+d+1)) \\ LE(2, d) &= p(2) \cdot (K + p(1) \cdot K \cdot (d+1)) \\ LE(2, d) &= p(2) \cdot (K + LE(1, d)) \end{aligned} \quad (9)$$

Si se calcula el valor de LE para más días, puede comprobarse que existe una formulación general recursiva:

$$LE(t, d) = p(t) \cdot (K + LE(t-1, d)) \quad (10)$$

A partir de esta formulación recursiva puede comprobarse que, si $p(t)$ toma un valor constante p , LE también tiende a un valor final constante LE_f que puede calcularse como:

$$LE_f = p \cdot (K + LE_f) \quad (11)$$

$$LE_f = \frac{p \cdot K}{(1-p)} = \frac{p \cdot K}{q} \quad (12)$$

Si se toma un periodo de tiempo (T) para el que se desea optimizar las fechas de limpieza, se puede calcular LE para cada día del intervalo de tiempo entre limpiezas. Actualizando el valor de d cada vez que se limpia la instalación se obtiene un perfil de las pérdidas esperadas para cada día.

$$PE(t, D) = \begin{cases} E(t) \cdot LE(t, T - D_n) & D_1 > t \\ E(t) \cdot LE(t - D_1, 0) & D_2 > t \geq D_1 \\ E(t) \cdot LE(t - D_2, 0) & D_3 > t \geq D_2 \\ \vdots & \vdots \\ E(t) \cdot LE(t - D_n, 0) & t \geq D_n \end{cases} \quad (13)$$

Dónde D es un vector que contiene los días del año en que se limpia la instalación $D = [D_1, D_2 \dots D_n]$ y $E(t)$ representa la energía producida por la planta en el día t .

Con las pérdidas de energía debidas a la suciedad anteriores, el problema consiste en minimizar las pérdidas económicas (J), que se obtiene de multiplicar, para cada día del año, PE por el coste de la energía ($C_{Energia}$) que se ha considerado constante y de 64.08 €/MWh. Esta retribución se ha obtenido a partir del precio medio de mercado y las ayudas estatales durante el año 2016.

$$J = \sum_{t=1}^T C_{Energia} \cdot PE(t, D) \quad (14)$$

Este cálculo se puede hacer para instalaciones de diferente potencia, variando el número de limpiezas anuales, así como los días en los que se realizan las mismas, la velocidad con la que se ensucian los paneles y la probabilidad de lluvia.

5. RESULTADOS

5.1. Detección de fallos

Calculando diariamente los índices descritos en la sección 3 ha sido posible detectar de manera automática diferentes fallos en una planta fotovoltaica real. Mediante el PR es posible detectar casos en los que un inversor deja de funcionar durante

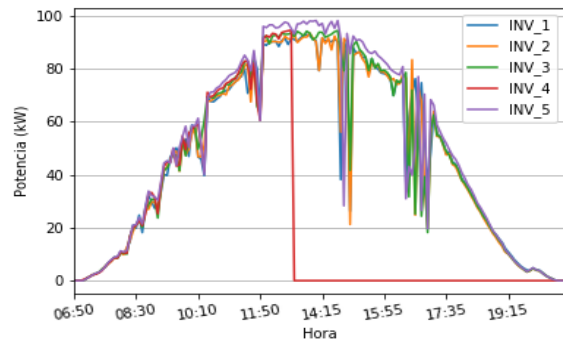
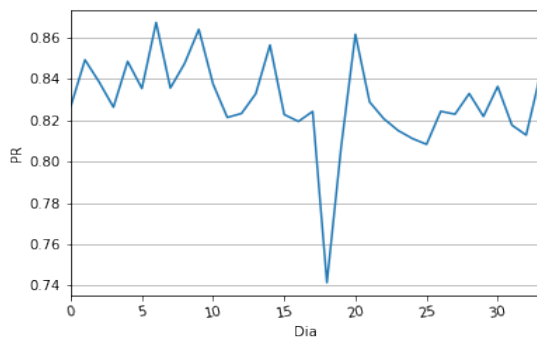


Figura 4: Fallo en un inversor

parte de un día, tal y como se muestra en la Figura 4.

En la Figura 5 se muestra como el día 16 el PR bajó hasta 0.74 por el motivo descrito anteriormente y, una vez reparado el problema, volvió a los valores habituales.

Figura 5: Variación del PR al fallar un inversor

Por lo que respecta al índice R , en la Figura 6 se muestra como inicialmente los inversores 2, 4 y 5 funcionaban entre un 4 y un 5% por debajo del inversor 3, mientras que el inversor 1 lo hacía un 10% por debajo. En el día 4 se produce la reparación de partes de la instalación, lo que mantiene algunas partes desconectadas provocando un descenso de los ratios. Durante esta reparación se sustituye 1 fusible fundido en series de los inversores 2, 4 y 5, y en el inversor 1 se cambian 2 fusibles. Esta reparación hace que en los días siguientes los inversores funcionen con ratios similares.

Otro caso de detección de fallo se muestra en la Figura 7. Al desconectarse una serie del inversor 1, su rendimiento baja de un día a otro un 4% aproximadamente, lo que permite detectar el fallo. Al saber en qué zona de la instalación está el fallo se puede ahorrar tiempo en la reparación, porque se encuentra el defecto revisando únicamente las series del inversor cuyo ratio ha bajado. Durante

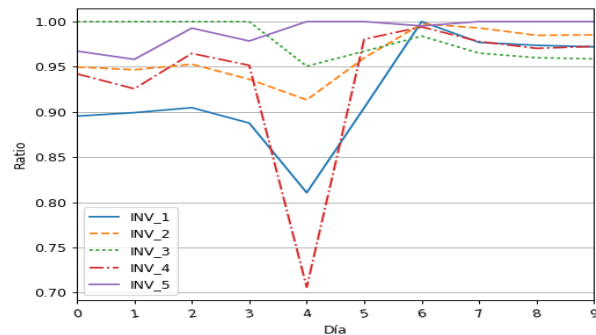


Figura 6: Variación del ratio al sustituir varios fusibles

el día 7 se realiza la reparación, por lo que el ratio ya mejora ligeramente y el día 8 ya recupera sus valores normales.

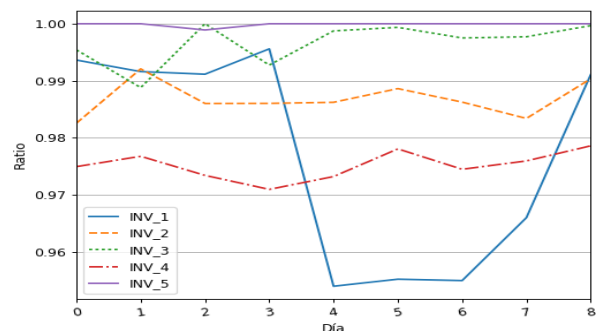


Figura 7: Variación del ratio al fundirse y cambiarse un fusible

5.2. Optimización de las limpiezas

Se dispone de datos de energía producida durante el año 2016 por una instalación de 583 kWp situada en España, así como de las precipitaciones diarias de ese mismo año.

En una primera aproximación se calcula una probabilidad diaria de lluvia para todo el año del 7.92% constante, sabiendo que llovió en 29 días de los 366.

Para comparar el efecto de la limpieza, primero se calculan las pérdidas anuales en caso de que no se limpiara nunca la instalación. Para eso se obtienen las pérdidas de rendimiento esperadas, que al ser constante la probabilidad de lluvia, tienden a un valor final constante LE_f como se ha descrito en (12).

Así, se obtiene un valor de $LE_f = 3.1\%$ que, multiplicado por la energía anual y su coste, da unas pérdidas económicas de 1588.95 €.

Limpiando los paneles una vez al año, las pérdidas varían en función del día del año en que se hace la

limpieza tal y como se muestra en la Figura 8. El mínimo en este caso se obtiene para el día 20 de mayo con un coste de 1511.05 €. El peor día para limpiar en este caso es el 15 de diciembre con unas pérdidas de 1575.95 €.

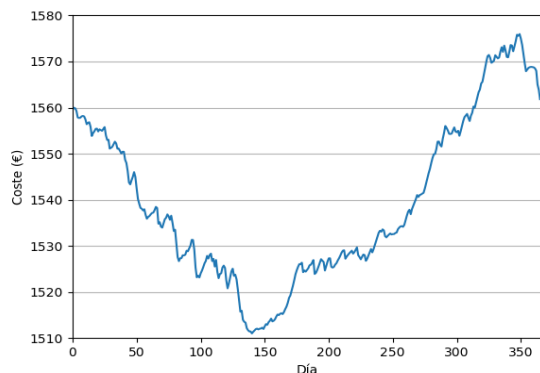


Figura 8: Coste asociado a las pérdidas por suciedad en función del día de limpieza

De los resultados obtenidos puede comprobarse que, con las probabilidades de lluvia consideradas, una limpieza de los paneles sólo resulta rentable si el coste de realizarla es muy bajo. No obstante, es habitual que los contratos de mantenimiento de plantas fotovoltaicas incluyan, entre otros servicios, una limpieza de paneles anual. En este caso, es interesante calcular el día óptimo para realizar esta limpieza de una manera más precisa.

Para ello, se han considerado probabilidades de lluvia diferentes para varios periodos del año. En concreto, a partir de análisis de históricos de lluvia en la localización de la planta, se han considerado unas probabilidades del 12% en diciembre, enero y febrero, del 2% en junio, julio y agosto y del 9% el resto del año.

En este caso no se obtiene un valor constante de LE cuando no se limpia nunca la instalación, sino un perfil que varía a lo largo del año al hacerlo la probabilidad de lluvia. En la Figura 9 se observa que las pérdidas de rendimiento son mayores en los meses de verano, cuando la probabilidad de lluvia es menor, llegando a un máximo del 11.49% el día 31 de agosto. Por el contrario, las pérdidas en invierno son las más bajas. Las pérdidas económicas anuales calculadas si no se limpia son de 2389.04 €.

En este caso, los costes en función de en qué día del año se realiza la limpieza se muestran en la Figura 10. El mejor día para limpiar la instalación es el 16 de Julio, con unas pérdidas de 1868.26 €.

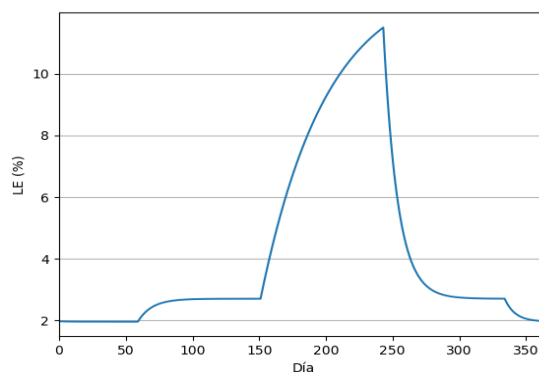


Figura 9: LE con probabilidades variables

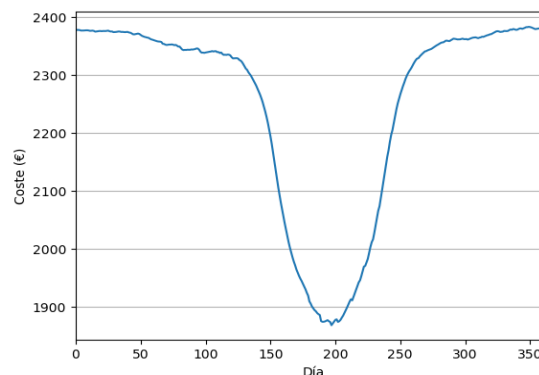


Figura 10: Coste en función del día de limpieza

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se proponen formas de mejorar el mantenimiento de las instalaciones fotovoltaicas mediante la detección de fallos y la optimización de las fechas y frecuencias de limpieza.

Se ha explicado cómo calcular y utilizar varios índices (PR y R), para detectar fallos graves, así como otros de menos importancia acaecidos aguas abajo de la zona donde se dispone de datos de monitorización. Este método se ha aplicado a instalaciones reales, detectando diferentes averías y mostrando también el efecto de las reparaciones.

Por otra parte, se ha planteado una forma de optimizar las fechas de limpieza para cualquier instalación, que permite introducir diferentes perfiles de suciedad así como costes de la energía variables y diferentes probabilidades de lluvia. Por tanto, se puede adecuar el problema a cualquier instalación. La diferencia entre limpiar o no limpiar es en el caso más realista de 520.78 €, por lo que dependerá del coste total de limpiar la instalación si resulta rentable hacer o no la limpieza.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente realizado bajo el proyecto “Dimensionado y uso óptimo de siste-

mas de almacenamiento de energía en microrredes y redes de distribución inteligentes” (P1·1B2015-36), financiado por la Universitat Jaume I de Castellón.

Referencias

- [1] International Renewable Energy Agency (IRENA), “Renewable energy statistics 2016,” 2016.
- [2] Fraunhofer ISE, “Photovoltaics Report,” no. November, 2016.
- [3] UNEF, “Informe Anual 2016,” *Unión Española Fotovoltaica*, 2016.
- [4] NREL, “Best Practices in Photovoltaic System Operations and Maintenance 2 nd Edition,” no. December, 2016.
- [5] B. Marion, J. Adelstein, H. Hadyen, B. Hammond, and T. Flether, “Performance parameters for grid-connected PV systems,” *31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition*, pp. 1601–1606, 2005.
- [6] J. Zorrilla-Casanova, M. Piliouline, J. Carretero, P. Bernaola-Galvan, P. Carpena, L. Mora-López, and M. Sidrach-De-Cardona, “Losses produced by soiling in the incoming radiation to photovoltaic modules,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 21, no. 4, pp. 790–796, 2013.
- [7] M. García, L. Marroyo, E. Lorenzo, and M. Pérez, “Soiling and other optical losses in solar-tracking PV plants in navarra,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 19, no. 2, pp. 211–217, 2011.

Modelado de micro-central hidráulica para el diseño de controladores con aplicación en regiones aisladas de Honduras

A. Tapia, P. Millán, F. Gómez-Estern, C. Ierardi, A. R. del Nozal
 Universidad Loyola Andalucía, {atapia,pmillan,fgestern,cierardi,arodriguez}@uloyola.es

Resumen

Este artículo trata el modelado de una planta de micro-generación destinada al abastecimiento eléctrico de regiones aisladas en países en vías de desarrollo. El objetivo del modelo es caracterizar fielmente el comportamiento de estas microcentrales ante acciones externas como la actuación sobre la válvula de admisión y la conexión o desconexión repentina de cargas. Este modelo permitirá el desarrollo de estrategias de control eficientes, robustas y sencillas, adaptadas al contexto de precariedad de este tipo de instalaciones.

1. Introducción

En 2012 [11] un 20 % de la población hondureña no disponía de acceso a electricidad y en las zonas rurales la cobertura llegaba al 50 % de la población, con desigual distribución según departamentos. De la producción eléctrica total (con un consumo de energía eléctrica de 711.1 kWh y 721 kWh per capita, en 2012 y 2013), el 43.7 % provenía de fuentes de energía renovables, en un país con un alto índice de vulnerabilidad (0.92) al cambio climático [10].

Los datos anteriores ilustran la relevancia al proyecto que aquí se presenta. La iniciativa en que se enmarca este trabajo, hereda la experiencia de la Fundación Hondureña de Investigación Agrícola (FHIA) en la instalación de micro-turbinas Pelton rudimentarias para la provisión de energía hidroeléctrica en zonas sin acceso al tendido eléctrico nacional. La tradicional turbina Pelton empleada por FHIA genera entre 7.5 y 15 kW y provee energía eléctrica limpia para entre 20 y 50 familias por comunidad, mejora las condiciones de vida de la población y logra preservar el medio ambiente, evitando talas para la quema de leña. La Universidad Loyola Andalucía y la Fundación ETEA están colaborando con FHIA en la mejora de sus sistemas de generación, así como del proceso de diseño e instalación en las comunidades. Como aplicación práctica, este proyecto se desarrolla en una planta piloto en la comunidad hondureña de San Miguelito, Departamento de Santa Bárbara.

Este trabajo, que constituye el primer paso en el desarrollo de nuevas soluciones encaminadas a mejorar los sistemas de generación, consiste en el modelado completo de una planta de generación micro-hidráulica, de forma que se caracterice de forma fiel el comportamiento de la misma ante variaciones de los agentes externos, como son la carga conectada y la válvula de admisión de caudal. Este modelo garantizará el testeo de los diferentes esquemas de regulación que se desarrollen en el mismo marco.

Para el modelado del sistema se ha utilizado un modelo de Bernoulli no estacionario para caracterizar el comportamiento del flujo de agua a lo largo de la tubería forzada, un modelo de interacción mecánica para determinar la dinámica del conjunto chorro-turbina-eje y un modelo de generador trifásico para obtener la evolución de las variables eléctricas en función del régimen de funcionamiento del generador. Gracias al modelo resultante de acoplar estos sub-modelos se ha permitido simular, utilizando el entorno Matlab®, el sistema completo, caracterizando tanto los puntos de operación como su evolución, así como las necesidades de control para la estabilización del suministro.

2. Descripción del sistema

En la planta estudiada, representada en la figura 1, pueden distinguirse dos partes: el sistema de conducción y el de generación:

- El sistema de conducción, formado por la presa, la tubería forzada y el inyector, está formado por los elementos destinados a la obtención del flujo de agua y la conversión de la energía potencial de éste en energía cinética.
- En el sistema de generación, formado por la turbina, el eje y el generador, la energía cinética es transformada en eléctrica.

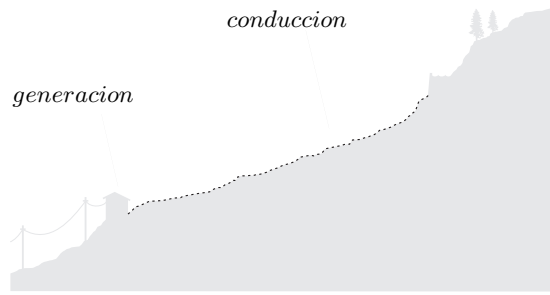


Figura 1: Esquema de la planta

3. Modelado

A continuación se presenta el desarrollo de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de cada una de las partes del sistema, cuya estructura se muestra en la figura (2), donde las variables de control son: la apertura de la válvula de entrada u (que determina el caudal q inyectado en la turbina), el ciclo de trabajo del chopper α (que determina el valor de la tensión de la excitación V_{fn}) y la carga conectada R . Las salidas de interés (las que requieren ser controladas) son la tensión de salida V_{fn} y la velocidad de giro de la turbina n , viniendo ésta determinada por el equilibrio de momentos en el eje, entre el momento motor provocado por la turbina M_m y el resistente M_{res} , provocado por el generador y la fricción.

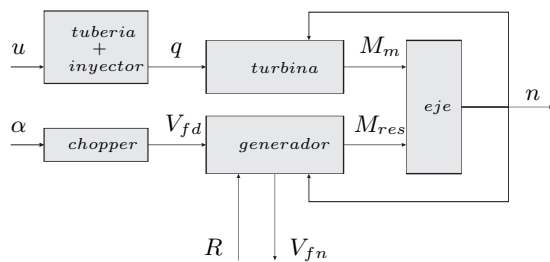


Figura 2: Esquema del sistema completo

3.1. Presa y tubería forzada

Para analizar la variación del caudal q a través de la tubería forzada se ha asumido la hipótesis de líquido incompresible. Con esta hipótesis, el principio de Bernoulli para flujos no estacionarios [3] se puede expresar como:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{L_p}{gA_p}(H_g - h_{jet} - h_{fric}), \quad (1)$$

donde (H_g representa la altura bruta de la instalación (definida como la diferencia de cota entre la presa y la turbina), la altura del agua en la inyección (definida como la energía cinética del chorro en la entrada de la turbina de acción) y las

pérdidas de altura provocadas por la fricción a lo largo de la tubería. Introduciendo la constante de tiempo $T_w = L_p/gA_p$, la ecuación anterior puede expresarse como:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{1}{T_w}(H_g - h_{jet} - h_{fric}). \quad (2)$$

El término de fricción de la expresión 1 puede estimarse según diferentes expresiones experimentales de la literatura. Utilizando la expresión de Hazen-Williams [1] para flujo completamente desarrollado en tuberías, el término puede expresarse como el producto de una constante de la tubería por el cuadrado del caudal, según:

$$h_{fric} = K_p q^2, \quad (3)$$

donde la constante K_p se puede definir como:

$$K_p = 0,2787CD^{2,63}S^{0,54}q^2, \quad (4)$$

donde D es el diámetro de la tubería forzada y C es una constante propia del material y del proceso de fabricación de la misma.

3.2. Inyector

El comportamiento del caudal q al atravesar el inyector puede asumirse ideal. La altura del chorro de agua al final de la tubería forzada es igual a la altura a la salida del inyector, donde se convierte íntegramente en energía cinética, según

$$h_{jet} = \frac{v_{jet}^2}{2g}. \quad (5)$$

Asumiendo que el flujo está completamente desarrollado, la velocidad del chorro v_{jet} puede determinarse como el caudal dividido por el área de salida S_{jet} :

$$v_{jet} = \frac{q}{S_{jet}}. \quad (6)$$

El área de salida es variable, y depende de la posición de la válvula u , de manera que debe establecerse una relación entre S_{jet} y u . Generalmente, la geometría de los inyectores implica relaciones no lineales entre estas variables, y se pueden encontrar diferentes propuestas no lineales en la literatura [2] [7]. Por simplificación, en el presente trabajo se asumirá la linealidad entre la actuación y el área de salida, de forma que la posición de la válvula sea directamente proporcional al caudal q , quedando que $S_{jet} = S_{noz}u$. Sustituyendo esta expresión en (6) se tiene:

$$v_{jet} = \frac{q}{S_{noz}u}, \quad (7)$$

donde la posición de la válvula u puede variar entre 0 (completamente cerrada) y 1 (completamente abierta). Sustituyendo el valor de v_{jet} en la

expresión (5), se obtiene que la altura entregada por el chorro es:

$$h_{jet} = \frac{q^2}{2gS_{noz}^2 u^2}. \quad (8)$$

3.3. Turbina Pelton

Debido a las características de gran altura bruta y bajo caudal, la turbina estudiada para esta aplicación es de acción tipo Pelton [6]. En estas turbinas, el agua impacta, a presión atmosférica, sobre una serie de cucharas dispuestas radialmente en el rodete, como se muestra en la figura 3.

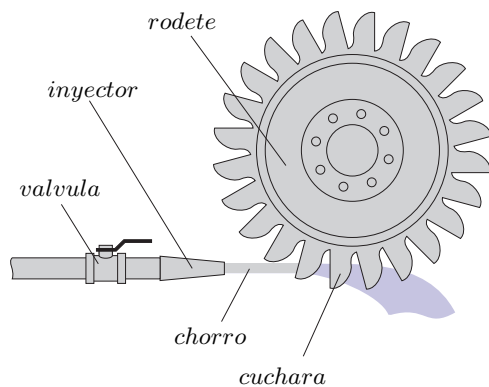


Figura 3: Esquema de funcionamiento de la turbina Pelton

Asumiendo un comportamiento ideal, al impactar en las cucharas el chorro se divide simétricamente y recorre el interior de las mismas (figura 4), saliendo de ellas en la misma dirección y sentido contrario que la entrada. Utilizando u , v y w

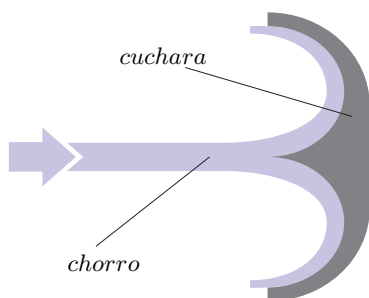


Figura 4: Impacto del chorro sobre una cuchara de la turbina

para denominar, respectivamente, a la velocidad de la cuchara, la velocidad del chorro y la velocidad relativa de éste respecto a la cuchara, queda claro que, mediante composición de velocidades, $w = v - u$. Utilizando los subíndices 1 y 2 para la entrada y la salida, respectivamente, los triángulos de velocidades de la turbomáquina quedan como se muestra en la figura 5.

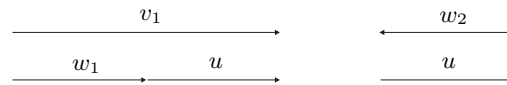


Figura 5: Triángulos de velocidad a la entrada (arriba) y a la salida (abajo)

La ecuación fundamental de las turbomáquinas [9] [8] permite detener la energía específica intercambiada gH_t en función de las velocidades anteriormente descritas, según:

$$gH_t = u_1 v_{u1} - u_2 v_{u2},$$

donde el subíndice u indica la proyección sobre la velocidad tangencial de la cuchara. Sustituyendo los valores deducidos de los triángulos de velocidades de la figura 5, la expresión anterior queda:

$$gH_t = 2u(v_1 - u). \quad (9)$$

la velocidad de la cuchara u se puede expresar en función de la velocidad angular del rodete n como $u = nR$, y la velocidad de entrada v_1 no es más que la velocidad del chorro calculada anteriormente, v_{jet} . La potencia intercambiada se puede obtener como el producto de la energía específica por la densidad del flujo ρ y por el caudal volumétrico q , quedando:

$$P = \rho g q H_t,$$

donde el término gH_t está definido en (9). La potencia, asimismo puede definirse como el momento que ejerce el chorro sobre el rodete (momento motor), M_m , multiplicado por el radio del mismo, R_p . De esta manera, se puede obtener el momento motor como:

$$M_m = 2\rho q \left(\sqrt{2gh_{jet}} - nR_p \right) R_p \quad (10)$$

Sustituyendo aquí la expresión (8), queda:

$$M_m = 2\rho R_p \left[\frac{q}{S_{noz}^2 u} - nR_p \right] q \quad (11)$$

3.4. Rodete

El comportamiento del conjunto turbina-eje-generador puede determinarse aplicando el equilibrio de momentos sobre el mismo, como se muestra en la figura 6. Denominando con J la inercia total del conjunto, la ecuación de equilibrio queda:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{J} (M_m - M_{res}), \quad (12)$$

donde M_m está definido en (11), M_{res} representa el momento total resistente, que involucra tanto al

par eléctrico provocado por la carga conectada al generador, M_e , como al par de fricción M_f de los cojinetes, según:

$$M_{res} = M_e + M_f. \quad (13)$$

El efecto del rozamiento viscoso de los cojinetes puede expresarse como un momento lineal con la velocidad de giro del eje n , tal que:

$$M_f = K_s n, \quad (14)$$

siendo K_s una constante del conjunto mecánico.

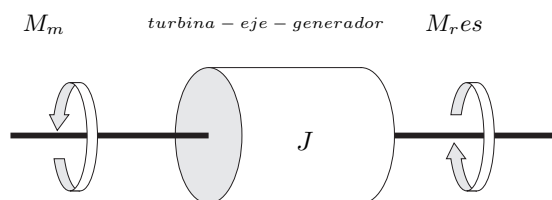


Figura 6: Esquema de la planta

3.5. Generador

Para determinar el valor del par eléctrico resistente M_e , se utilizará un modelo dinámico del generador. Se considera una máquina síncrona de polos salientes, cuyo esquema se muestra en la figura 7.

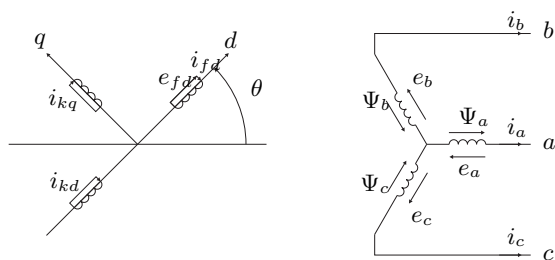


Figura 7: Esquema del generador síncrono: rotor (izq.) y estator (dcha)

Se harán además las siguientes hipótesis, :

1. Se despreciará la saturación e histéresis del núcleo magnético
2. Las inductancias propias y mutuas del rotor no varían con la posición del mismo.
3. Las inductancias propias y mutuas del estator varían sinusoidalmente con la posición del mismo.

4. Los flujos magnéticos provocados por las corrientes en los enrollados son sinusoidales en el entrehierro.

Partiendo de estos supuestos, se desarrolla el modelo del generador planteando las ecuaciones en los circuitos eléctricos y magnéticos de cada uno de los 6 enrollados del esquema de la figura 7. Para el enrollado de la fase a , las ecuaciones de tensión y de flujo magnético quedan:

$$e_a = \frac{d\psi_a}{dt} - R_a i_a, \quad (15)$$

$$\psi_a = -l_{aa}i_a + l_{ab}i_b + l_{ac}i_c - l_{afd}i_{fd} - l_{akd}i_{kd} - l_{akq}i_{kq}, \quad (16)$$

siendo análogas las expresiones correspondientes a las fases b y c .

Por otra parte, las ecuaciones de tensión en los enrollados del rotor quedan:

$$\begin{aligned} e_{fd} &= \frac{d\psi_{fd}}{dt} - R_{fd}i_{fd}, \\ 0 &= \frac{d\psi_{kd}}{dt} - R_{kd}i_{kd}, \\ 0 &= \frac{d\psi_{kq}}{dt} - R_{fd}i_{kq}. \end{aligned} \quad (17)$$

Y las ecuaciones de enlace de flujo de los enrollados del rotor son:

$$\begin{aligned} \psi_{fd} &= L_{ffd}i_{fd} + L_{fkd}i_{kd} + L_{afd}i_a + L_{bfd}i_b + L_{cfd}i_c \\ \psi_{kd} &= L_{kkd}i_{kd} + L_{fkd}i_{fd} + L_{akd}i_a + L_{bkd}i_b + L_{ckd}i_c \\ \psi_{kq} &= L_{kkq}i_{kq} + L_{akq}i_a + L_{bkq}i_b + L_{ckq}i_c \end{aligned} \quad (18)$$

Es importante notar que, mientras las inductancias propias L_{ffd} , L_{kkd} y L_{kkq} y la inductancia mutua L_{fkd} son constantes, las inductancias mutuas entre rotor y estator l_{afd} , l_{akd} y l_{akq} , junto con las correspondientes a las fases b y c , varían sinusoidalmente con el ángulo θ .

Para evitar la complejidad que implica la dependencia de las inductancias con la posición del rotor (que a su vez depende del tiempo), el modelo se desarrollará con las variables abc transformadas en los ejes rotatorios $dq0$, utilizando el procedimiento conocido como la transformación de Park:

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{pmatrix} = [T] \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix}, \quad (19)$$

donde la matriz T de la transformación es:

$$T = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix}.$$

De esta manera, en términos de las nuevas variables las inductancias son invariables con la posición del rotor θ . La corriente i_d puede interpretarse como la corriente instantánea que circula por un enrollado de armadura ficticio ubicado en el mismo eje d del rotor, girando a su misma velocidad (figura 8). Análogamente, la corriente i_q se puede interpretar como la que circula por un enrollado dispuesto con 90° de adelanto al anterior. La corriente i_0 se corresponde a la corriente de secuencia cero asociada a las componentes simétricas. Evidentemente, el campo magnético resultante de las corrientes i_d , i_q e i_0 deben ser igual al correspondiente a las corrientes originales.

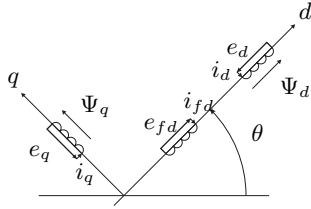


Figura 8: Esquema del generador síncrono: rotor (izq.) y estator (dcha)

Aplicando ahora la matriz de transformación de Park a los enlaces de flujo y corrientes de la expresión (16) y sus análogas para las fases b y c , se obtienen las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}\psi_d &= -L_d i_d + L_{afd} i_{fd} + L_{akd} i_{kd} \\ \psi_q &= -L_q i_q + L_{akq} i_{kq} \\ \psi_0 &= -L_0 i_0\end{aligned}\quad (20)$$

Expresando (18) en términos de las corrientes en ejes rotatorios $dq0$ se tiene:

$$\begin{aligned}\psi_{fd} &= L_{ffd} i_{fd} + L_{fkd} i_{kd} - \frac{3}{2} L_{afd} i_d \\ \psi_{kd} &= L_{kkd} i_{kd} + L_{fkd} i_{fd} - \frac{3}{2} L_{akd} i_d \\ \psi_{kq} &= L_{kkq} i_{kq} - \frac{3}{2} L_{akq} i_q\end{aligned}\quad (21)$$

Haciendo lo mismo con las ecuaciones de tensión, se tiene:

$$\begin{aligned}e_d &= \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \frac{d\theta}{dt} - R_a i_d \\ e_q &= \frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d \frac{d\theta}{dt} - R_a i_q \\ e_0 &= \frac{d\psi_0}{dt} - R_a i_0\end{aligned}\quad (22)$$

El valor del par eléctrico resistente se puede obtener en función de las variables estudiadas (REFERENCIA) como:

$$M_e = \frac{3}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \frac{pf}{2}, \quad (23)$$

con ψ_d , i_q , ψ_q , i_d definidos anteriormente.

Por último, la ecuación de tensión (15), junto con las correspondientes a las fases b y c se mantienen iguales que en la formulación en variables abc :

$$\begin{aligned}e_{fd} &= \frac{d\psi_{fd}}{dt} + R_{fd} i_{fd} \\ 0 &= \frac{d\psi_{kd}}{dt} + R_{kd} i_{kd} \\ 0 &= \frac{d\psi_{kq}}{dt} + R_{kq} i_{kq}\end{aligned}\quad (24)$$

El acoplamiento de las variables eléctricas con la posición del rotor viene dado por la relación existente entre la velocidad de giro del eje n , y θ , según:

$$n = \frac{2}{p_f} \frac{d\theta}{dt}, \quad (25)$$

expresión con la cual queda completamente definido el comportamiento del generador. Con el fin de simplificar el modelo, se asumirán cargas puramente resistivas, simétricas y equilibradas, de manera que las expresiones (20) quedan:

$$\begin{aligned}e_d &= R i_d \\ e_q &= R i_q\end{aligned}$$

Además, ya que el sistema está destinado a funcionar en una red aislada, no aparecerán corrientes inducidas en el rotor por la diferencia de velocidad mecánica y del campo magnético producido por las corrientes de armadura, por lo que se despreciarán los enrollados amortiguadores en el modelo.

Se despreciarán además las tensiones por variación de flujo magnético, como suele ser habitual en los estudios dinámicos de sistemas eléctricos de potencia [12] [13]. Así, las expresiones de tensión del estator (24) pasan a ser:

$$\begin{aligned}e_d &= -\psi_q \frac{d\theta}{dt} - R_a i_d \\ e_q &= \psi_d \frac{d\theta}{dt} - R_a i_q\end{aligned}\quad (26)$$

Por último, se asumirá que la corriente de armadura i_d es constante, despreciando las componentes alternas que se puedan producir en condiciones transitorias, ya que son despreciables. Con esta simplificación, el enrollado de campo se reduce al circuito mostrado en la figura 9. de manera que las ecuaciones (24) se reducen a la siguiente expresión:

$$e_{fd} = L_{ffd} \frac{di_{fd}}{dt} + R_{fd} i_{fd}, \quad (27)$$

donde le tensión de excitación e_{fd} es una variable controlada según:

$$e_{fd} = \alpha V_{cc}, \quad (28)$$

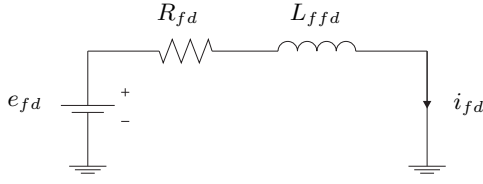


Figura 9: Circuito equivalente del enrollado de campo

siendo V_{cc} la tensión continua de entrada a chopper, y α el ciclo de trabajo del chopper, que puede variar entre 0 y 1. Con esta expresión queda completo el modelo simplificado del generador síncrono. Cabe recordar que, aunque al haberse formulado el modelo en ejes rotatorios dq las variables del estátor son una transformación ficticia de las reales, el valor efectivo de la tensión fase-neutro se puede expresar a partir de las tensiones en estos ejes, puesto que se ha considerado una carga simétrica y equilibrada. El valor de esta tensión es:

$$V_{fn} = \frac{\sqrt{e_d^2 + e_q^2}}{\sqrt{2}}. \quad (29)$$

Aunque el efecto de la saturación magnética no se ha tenido en cuenta (se asume que la relación entre la corriente y el flujo magnético por un enrollado es lineal), para asumir este efecto se propone para el modelo una aproximación lineal, en la forma:

$$L_{afd}i_{fd} \approx L_{afd,sat}i_{fd} + \psi_{adf,0}, \quad (30)$$

siendo necesario asumir la hipótesis de que el generador no operará a más de un tercio de su corriente nominal.

Se introducirá también al par eléctrico un término de par resistente provocado por las pérdidas de potencia en el núcleo magnético. Estas pérdidas se consideran como la suma de las pérdidas por histéresis, pérdidas por corrientes de Eddy y pérdidas anómalas [5] [4]. Estas últimas se suelen despreciar, resultando la potencia perdida como:

$$P_{Fe} = k_{Fe}n\dot{i}_{fd}^\beta + k_en^2e_{fd}^2,$$

siendo β el exponente de pérdida en el núcleo y k_{Fe} una constante de pérdidas en el núcleo, ambos parámetros constantes del generador. En esta expresión, el segundo puede despreciarse frente al primero, puesto que en el rango de velocidades nominales la intensidad i_{fd} es suficientemente pequeña como para despreciar su cuadrado. De esta forma, la expresión del par resistivo por pérdidas en el núcleo queda:

$$M_{Fe} = k_{Fe}i_{fd}^\beta. \quad (31)$$

Añadiendo el momento torsor M_{Fe} definido en (31) al valor del momento eléctrico de la expresión (23), se tiene que, finalmente:

$$M_e = \frac{3}{2}p_f^2n(R + R_a)(\varphi_{afd,sat} + L_{afd,0}i_{fd})^2 \frac{L_q^2p_f^2n^2 + 4(R + R_a)^2}{[L_qL_dp_f^2n^2 + 4(R + R_a)^2]^2} \quad (32)$$

4. Ecuaciones de estado

Finalmente, las ecuaciones de estado correspondientes al caudal (2), a la velocidad de giro de la turbina (12) y a la corriente de excitación (27), quedan:

$$\begin{aligned} \frac{dq}{dt} &= \frac{1}{T_w} \left(H_g - K_p q^2 - \frac{1}{2gS_{noz}^2} \left(\frac{q}{u} \right)^2 \right) \\ \frac{dn}{dt} &= \frac{1}{J} (M_m - M_e - M_f) \\ \frac{i_{fd}}{dt} &= \frac{1}{L_{ffd}} (\alpha V_{cc} - R_{fd}i_{fd}) \\ V_{fn} &= R \frac{p_f n}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{L_q^2 p_f^2 n^2 + 4(R + R_a)^2}}{L_q L_d p_f^2 n^2 + 4(R + R_a)^2} (\varphi_{afd,sat} + L_{afd,0}i_{fd}) \end{aligned} \quad (33)$$

donde M_m , M_e y M_f están definidos, respectivamente, en (11), (32) y (14).

Se ha llevado a cabo además una linealización del sistema, en la forma:

$$\dot{x} = Ax + Bu_c,$$

donde:

$$x = (q \quad n \quad i_{fd})^T, \quad u = (u \quad R \quad \alpha),$$

cuya adecuación al sistema real será de interés para el desarrollo de estrategias de control lineales.

5. Simulación

Tras completar el modelo completo del sistema continuo, se implementa numéricamente utilizando el software Matlab® para validar cualitativamente el funcionamiento del mismo. El valor de las constantes se resume en la tabla 1.

Se han realizado tres simulaciones, correspondientes a variaciones en las tres variables actuables:

- Apertura/cierre de la válvula de entrada u .
- Conexión/desconexión de carga R .
- Variación del ciclo de trabajo del chopper α .

Parámetro	Valor
g : aceleración de la gravedad, m/s^2	9.8
ρ : densidad del agua, Kg/m^3	1000
H_g : altura bruta, m	80
L_p : longitud de la tubería forzada, m	300
D_p : diámetro de la tubería forzada, m	0.20
D_{noz} : diámetro del inyector, m	0.022
p_f : número de polos del generador	4
V_{cc} : tensión continua del chopper, V	35
L_d : inductancia de eje directo, H	0.163
L_q : inductancia de eje en cuadratura, H	0.18
R_a : resistencia de armadura, Ω	3.87
L_{ffd} : inductancia de campo, H	0.5
R_{fd} : resistencia de campo, Ω	7.17
L_{afd_sat} : inductancia mutua saturada, H	0.094
ψ_{afd_sat} : enlace de flujo fijo, W vueltas	0.745
β : exponente de pérdida en el núcleo	0.7725
J : momento de inercia del conjunto	0.0588

Cuadro 1: Constantes del modelo simulado

En el primero de los casos, cuya evolución se muestra en la figura 10 para las variables de interés, se simula el cierre parcial brusco de la válvula de entrada (disminución correspondiente al 10 % del valor inicial). Se comprueba de forma cualitativa que la consecuencia es una disminución del caudal inyectado en la turbina, y por tanto la evolución a un nuevo punto de equilibrio de la velocidad de giro y la tensión en la salida hacia valores inferiores. Se aprecia cómo el modelo linealizado es capaz de representar fielmente este comportamiento.

En el segundo caso, mostrado en la figura 11, se ha simulado una desconexión repentina del 50 % de la carga conectada. Como se aprecia en la evolución de las variables de interés, la variable de caudal no se ve afectada ante variaciones de carga, evolucionando la tensión en la salida del generador y la velocidad de giro del rodete a valores superiores a los iniciales en un nuevo punto de equilibrio. Al igual que en el caso anterior, se puede comprobar cómo el sistema linealizado representa adecuadamente el comportamiento del sistema real.

En el tercer y último caso, se ha simulado una disminución del ciclo de trabajo del chopper en un 10 %, lo que provoca la disminución de la tensión a la salida del generador y de la velocidad de giro del rodete, manteniéndose inalterado el caudal, ya que es una variable desacoplada del sistema eléctrico. Se comprueba cómo en este caso el sistema linealizado, a pesar de representar adecuadamente el transitorio de las variables de interés, difiere de forma más notable en el valor del nuevo

equilibrio.

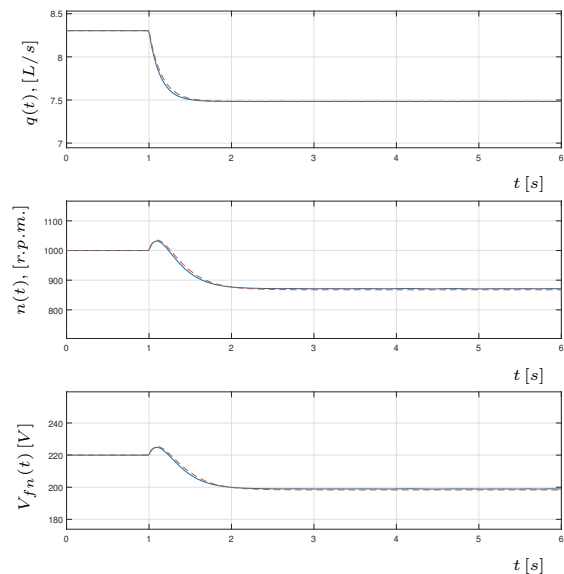


Figura 10: Evolución de las variables de interés ante un cierre parcial (10 %) brusco de la válvula en $t = 1s$ para el sistema real (continuo) y linealizado (discontinuo)

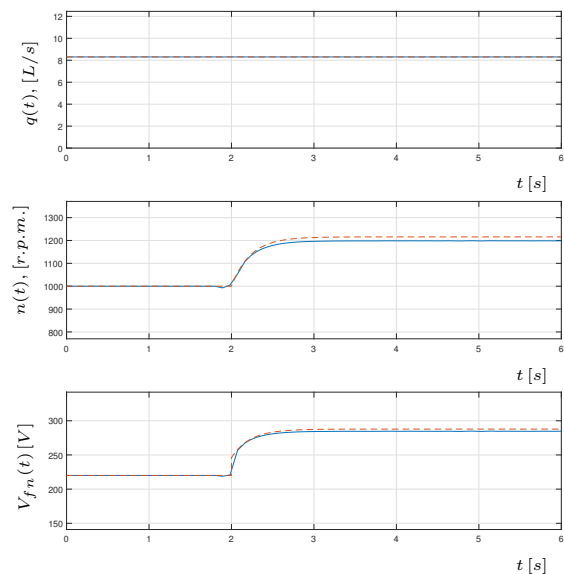


Figura 11: Evolución de las variables de interés ante una desconexión repentina de carga (50 %) en $t = 2s$ para el sistema real (continuo) y linealizado (discontinuo)

6. Conclusiones

En el presente documento se ha planteado el esquema básico de funcionamiento de una microcentral hidráulica. Asimismo, se ha llevado a cabo la formulación completa de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de cada uno de los subsistemas que lo componen, así como la

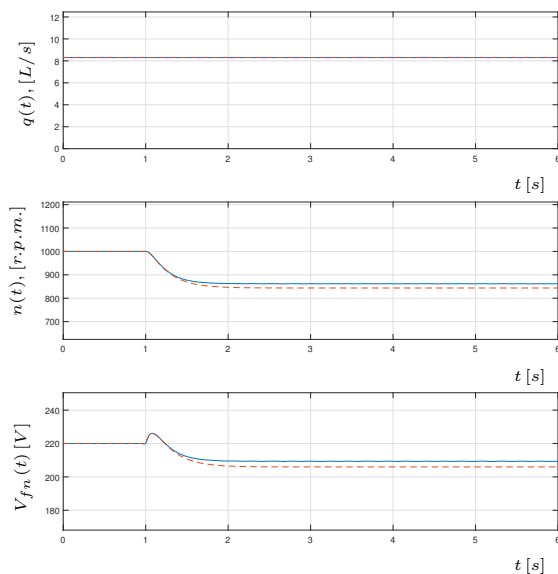


Figura 12: Evolución de las variables de interés ante una disminución brusca (10%) del ciclo de trabajo del chopper en $t = 1s$ para el sistema real (continuo) y linealizado (discontinuo)

relación entre éstos, permitiendo caracterizar el comportamiento real de la planta. A continuación, se ha llevado a cabo una linealización del sistema, llevándose a cabo la implementación numérica de ambos sistemas. Por último, se han realizado simulaciones de variaciones en las variables de entrada del sistema, permitiéndose así un análisis cualitativo sobre la bondad del sistema lineal como herramienta para el diseño de futuros controladores.

Este trabajo, enmarcado en el proyecto de mejora de micro-centrales hidráulicas para el abastecimiento de comunidades aisladas, se verá complementado por una validación experimental del sistema mediante las simulaciones empíricas de un sistema real en un banco de ensayos, constituyendo el estudio la herramienta fundamental para el desarrollo de estrategias de control, siendo éste el objetivo de la siguiente etapa del proyecto.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Agencia Estatal de Investigación y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (AEI / FEDER, UE):

Proyectos: DPI-75294-CS-2-R (AEI / FEDER, UE) y (DPI-75294-CS-2-R, TEC2016-80242-P).

Referencias

- [1] Robert H. Perry Don W. Green. *Perry's Chemical Engineers' Handbook, Eighth Edition*. McGraw-Hill, 2008.
- [2] Benzon D. et al. Numerical investigation of the spear valve configuration on the performance of pelton and turgo turbine injectors and runners. *Journal of Fluids Engineering*, 137, 2015.
- [3] Monika Soni et al. Modeling of hydraulic turbine for analyzing effect of penstock parameter variation on mechanical power. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 3, 2015.
- [4] Nam H. et al. On the variation with ux and frequency of the core loss coefficients in electrical machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006.
- [5] Popescu M. et al. A study of the engineering calculations for iron losses in 3-phase ac motor models. *Industrial Electronics Society. 33rd Annual Conference of the IEEE*, 2007.
- [6] Williamson S.J. et al. Low head pico hydro turbine selection using a multi-criteria analysis. *Renewable Energy*, 61, 2014.
- [7] Zidonis A. et al. State of the art in numerical modelling of pelton turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 2015.
- [8] Thake J. *Micro-hydro Pelton Turbine Manual*. Practical Action, 2000.
- [9] Nogueira J.I. Lecuona A. *Turbomáquinas. Procesos, análisis y tecnología*. Editorial Ariel, 2000.
- [10] Maplecroft. índice de vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en la región de américa latina y el caribe. 2014.
- [11] Banco Mundial. 2012.
- [12] Kundur P. *Power System Stability and Control*. Mc Graw-hill, 1991.
- [13] Palma Behnke R. *Los Sistemas Eléctricos de Potencia*. 2008.

FRAMEWORK PARA EL MODELADO DE UN LAGO DE DATOS

J.M. Torres¹, R.M. Aguilar², C.A. Martín³, S. Díaz

Department of Computer and Systems Engineering, University of La Laguna

38200 La Laguna (Tenerife), España.

¹jmtorres@ull.edu.es, ²raguilar@ull.edu.es, ³carlos.martin.galan@iac.es

Resumen

La necesidad de trabajar con grandes cantidades de datos para realizar clasificaciones, detectar patrones, identificar sistemas y predecir el comportamiento futuro de los mismos exige un entorno escalable que permita obtener el valor oculto en los datos. En este trabajo se presenta una pila formada por un almacén de datos, un visualizador y un gestor de flujos de trabajo para la ejecución de tareas, como marco general para el uso masivo de los datos. Siendo esta estructura general para cualquier dominio y formada por herramientas de software libre.

Palabras Clave: Lago de Datos, Elasticsearch, Kibana, AirFlow

1 INTRODUCCIÓN

No es ninguna novedad, que en la actualidad la captura y el almacenamiento de datos tiene un coste muy bajo. Este hecho nos permite disponer de una gran cantidad de datos almacenados. Además del gran volumen de información, existe una gran variedad de datos que pueden ser representados de diversas maneras: Por ejemplo, a través de los dispositivos móviles se puede capturar audio, video, localizaciones de GPS y otros valores proporcionados por los distintos sensores del dispositivo. Además existen incontables sensores digitales en equipos industriales, automóviles, medidores eléctricos, veletas, anemómetros, etc., los cuales pueden medir y comunicar posición, movimiento, vibración, temperatura, humedad y hasta los cambios químicos que sufre el aire. Pero no sólo nos referimos a datos procedentes de tecnologías que permiten conectarse a otros dispositivos Machine-to-Machine (M2M); también se deben incluir datos alojados en las redes sociales como Facebook, Twitter, LinkedIn, blogs, etc; que nos permiten conocer los gustos y preferencias de los usuarios y, yendo más allá, incluso sus estados de ánimo. O datos procedentes de las transacciones realizadas entre cliente-empresa, que incluyen registros de facturación y, en telecomunicaciones,

registros detallados de las llamadas, etc. Además, de la información que generamos las personas en un call center al establecer una llamada telefónica: notas de voz, correos electrónicos, documentos electrónicos, estudios médicos, etc. Todo ello nos lleva a pensar que no sólo disponemos de una cantidad ingente de datos almacenados sino que además, estos pueden ser estructurados, no estructurados o semi estructurados.

Los datos pueden esconder información de gran valor para saber no sólo lo que sucede a nuestro alrededor, sino también lo que va a pasar en un futuro, obteniendo niveles de precisión muy altos. Para poder tratar estas cantidades de datos y darle valor añadido a los datos extrayendo el conocimiento existen en ellos, las técnicas tradicionales de estadística y las herramientas de gestión clásicas no sirven debido a que no están preparadas para trabajar con tanta información ni aún menos con datos tan variados. Por lo que se hace evidente la necesidad de nuevas herramientas de análisis de este Big-Data.

Big Data es el proceso de recolección de grandes cantidades de datos y su inmediato análisis para encontrar información oculta, patrones recurrentes, nuevas correlaciones, etc. El conjunto de datos es tan grande y complejo que los medios tradicionales de procesamiento son ineficaces. Y es que estamos hablando de desafíos como analizar, capturar, recolectar, buscar, compartir, almacenar, transferir, visualizar, etc., ingentes cantidades de información, obtener conocimiento en tiempo real y poner todos los sentidos en la protección de datos personales. Las características que exhiben este proceso son [1]:

- **Volumen:** captar y organizar absolutamente toda la información que nos llega es esencial para tener registros completos e insesgados, y que las conclusiones que obtengamos sirvan eficientemente a la hora de la toma de decisiones.
- **Velocidad:** es importante el tiempo si afrontamos tanto la necesidad de generar información como de analizarla, pero lo es más si necesitamos reaccionar inmediatamente. Todo el proceso pide agilidad para extraer valor de negocio a la

información que se estudia y que no se pierda la oportunidad.

- Variedad: Hay que dar uniformidad a toda la información, que tendrá su origen en datos de lo más heterogéneos. Una de las fortalezas del Big Data reside en poder conjugar y combinar cada tipo de información y su tratamiento específico para alcanzar un todo homogéneo.
- Veracidad: la calidad del dato y su disponibilidad hay que encontrar herramientas para comprobar la bondad de la información recibida.
- Valor: Trabajar con Big Data tiene que servir para aportar valor a la sociedad, las empresas, los gobiernos, en definitiva, a las personas; todo el proceso tiene que ayudar a impulsar el desarrollo, la innovación y la competitividad, pero también mejorar la calidad de vida de las personas.

Debido a estas características, se hace fundamental el diseño de un marco de monitorización, almacenamiento, análisis y visualización de esta gran cantidad de datos con el objetivo de maximizar la escalabilidad. En este trabajo se presenta un modelo para la explotación de grandes volúmenes de datos de manera que permita la monitorización en tiempo real de datos procedentes de distintas fuentes, su almacenamiento, análisis y visualización para la ayuda a la toma de decisiones. El artículo describe en la sección 2 las características de un lago de datos y el marco de trabajo en el que organizarlo. En la sección 3 se describe la implementación de dicho framework. Finalmente se terminan con unas conclusiones.

2 MODELO DE GESTIÓN DE UN LAGO DE DATOS

Un lago de datos alberga una gran cantidad de datos primarios en su formato nativo hasta que resultan necesarios [2]. Mientras que un depósito de datos jerárquico (datawarehouse) almacena datos en archivos o carpetas, un lago de datos utiliza una arquitectura plana para almacenar datos. Cada elemento de datos en un lago tiene asignado un identificador único y está marcado con un conjunto de etiquetas de metadatos extendidos. Cuando surge el análisis de un elemento, resulta posible efectuar una consulta al lago de datos en busca de datos relevantes y, al mismo tiempo, cabe la posibilidad de analizar dicho conjunto de datos más pequeño para ayudar a responder a la consulta. Esta estructura plana de lago de datos se adapta bien a los datos de los cuales decidimos mantener la historia sin necesidad de saber de antemano qué análisis les serán aplicados. Manteniendo los datos

en bruto y sin estructura, ninguna elección previa restringe las posibilidades posteriores de análisis. Los datos son almacenados en una forma de multitud de archivos distribuidos. Y es en el momento de la fase de análisis que los datos son reagrupados y que una eventual estructura es creada. Conservar, por ejemplo, los logs de un sitio web durante varios años, los tuits mencionando unos temas, los estados sociales, los comentarios de los blogs, las fotos etiquetadas, etc. todo esto sin saber previamente cómo estos datos serán cruzados en el futuro, son ejemplos de lago de datos.

Con un lago de datos, simplemente basta volcar todos los datos, tanto los estructurados como los no estructurados, en el lago y luego permitir que las personas “destilen” sus propias visualizaciones particulares utilizando aquella tecnología que mejor se adapte a la tarea (por ej., SQL o NoSQL, bases de datos basadas en disco o en memoria, MPP o SMP.) Y el usuario crea sus visualizaciones de empresa mediante la compilación y agregación de datos desde múltiples vistas locales.

Pero a pesar de los muchos beneficios, los lagos de datos también vienen con riesgos, incluyendo la pérdida de contexto significativo, si estos datos no están debidamente gestionados. La gobernanza de los datos no incluye sólo la catalogación e indexación, así como la gestión de metadatos. Sino que es importante la estrategia, como la localización de quién se encarga de decidir qué datos se almacenan y cómo se realiza la definición adecuada de los datos.

En este trabajo se define un marco de desarrollo que establece los mecanismos para la monitorización, almacenamiento, análisis y visualización del lago de datos. Teniendo como objetivos que este modelado cubra las especificaciones de tiempo real y escalabilidad en el manejo de datos.

Hay muchas soluciones en el mercado para cubrir esta necesidad, tanto de pago como libres, pero una de las más populares es la plataforma Elasticsearch, Logstash y Kibana, conocida como ELK.

Esto es debido, en parte, a la escalabilidad que proporcionan los clusters de Elasticsearch, que puede manejar terabytes de datos sin ningún problema. Kibana, por su parte, aporta gran funcionalidad en la visualización de datos, pues no está limitado a gráficas de series temporales y puede manejar cualquier conjunto de datos.

Actualmente muchos sistemas genera un fichero de logs de su actividad (sistemas operativos, programas, aplicaciones móviles, redes, etc.) y uno de los principales usos de la plataforma ELK es el almacenamiento y análisis de estos. En ese contexto el papel de Logstash es el de agente de recogida y preparación, para su almacenamiento en Elasticsearch, de dichos logs, por lo que muchas

veces es necesario cuando se pone en marcha una plataforma de este tipo.

En ocasiones los datos deben ser procesados y analizados antes de visualizarlos. Además de que en muchos casos los datos no proceden directamente de un fichero de log, donde se han almacenado las transacciones que se realizan en un sistema, sino que se requiere ejecutar un proceso más complejo para extraer los datos a analizar. Entonces es muy útil disponer de una herramienta de gestión de flujos de trabajo que se encargue de ejecutar las tareas necesarias. Por lo tanto, la pila de

gestión de un lago de datos estaría formado por un gestor de datos tipo Elasticsearch, un visualizador de datos como Kibana y un gestor de tareas para la recogida y análisis de datos (Figura 1) que en este caso será AirFlow. en lugar del componente Logstash de la pila ELK estándar.

La propuesta que se plantea en este trabajo es utilizar la herramienta Airflow para la monitorización y análisis de datos. Elasticsearch como contenedor del lago de datos. Y la herramienta visualizadora Kibana para la realización de los cuadros de mandos pertinentes.

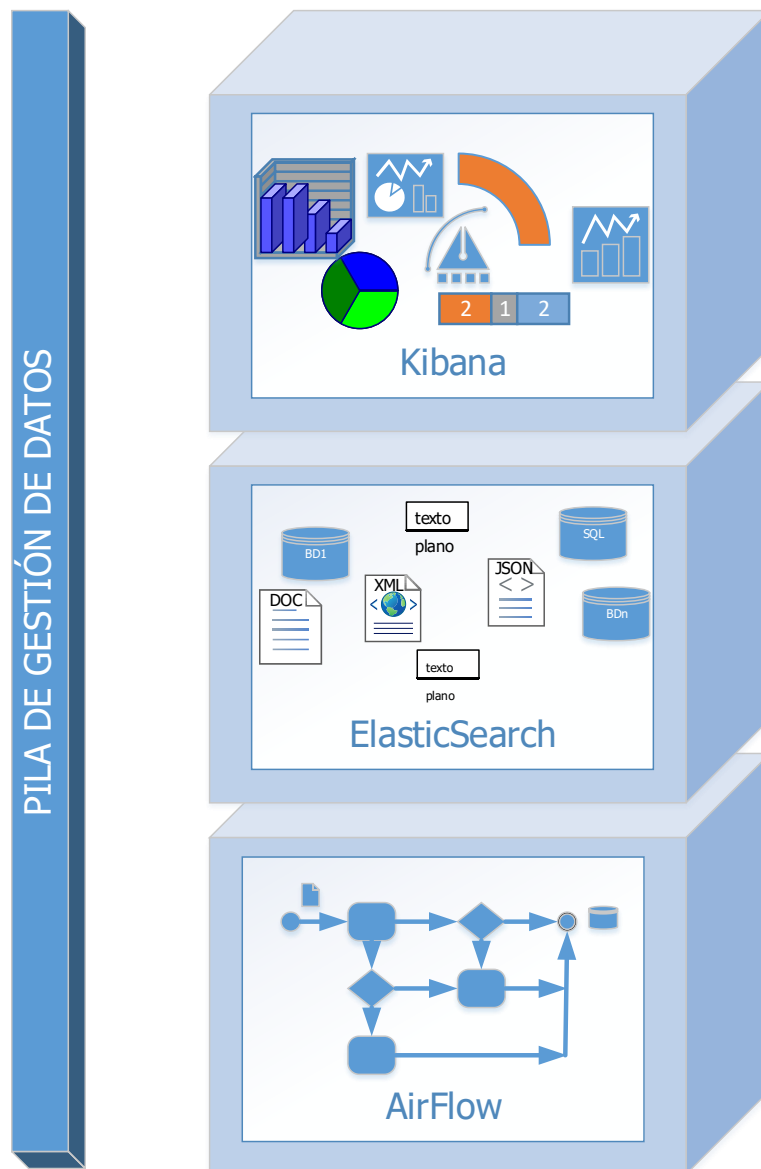


Figura 1.- Pila AEK (Airflow-ElasticSearch-Kibana) para la gestión de un lago de datos.

3 IMPLEMENTACIÓN DE LA PILA AEK EN REDES SOCIALES

3.1 AIRFLOW

Airflow es una herramienta que facilita la gestión de flujos de trabajo, permitiendo su programación, planificación y control. Tiene funcionalidades avanzadas que permiten a través de interfaz web explorar el conjunto de tareas programadas, pudiendo hacer un seguimiento a las que se han realizado con éxito o las que están pendientes de ejecución.

Así, para programar las tareas a realizar se define el grafo dirigido acíclico (DAG – Directed Acyclic Graph) donde se especifica el orden de las tareas a realizar. El encargado de ejecutar este grafo es el planificador que se asegura del cumplimiento de las

dependencias entre tareas para respetar la causalidad.

Mientras que los DAG describen cómo ejecutar un flujo de trabajo (Figura 2), los operadores son los que determinan lo que realmente se hace. Un operador describe una única tarea en un flujo de trabajo. Los operadores son por lo general atómicos, lo que significa que no necesitan compartir recursos con otros operadores. El DAG se asegura de que los operadores se ejecuten en el orden correcto; aparte de esas dependencias los operadores generalmente se ejecutan de forma independiente.

El conjunto de tareas a realizar son la monitorización de los entornos donde extraer los datos (redes sociales, sistemas empresariales, dispositivos móviles, ...). Tareas relacionadas con el análisis de estos datos, que pueden ser desde estadísticas hasta predicciones basadas en redes neuronales.

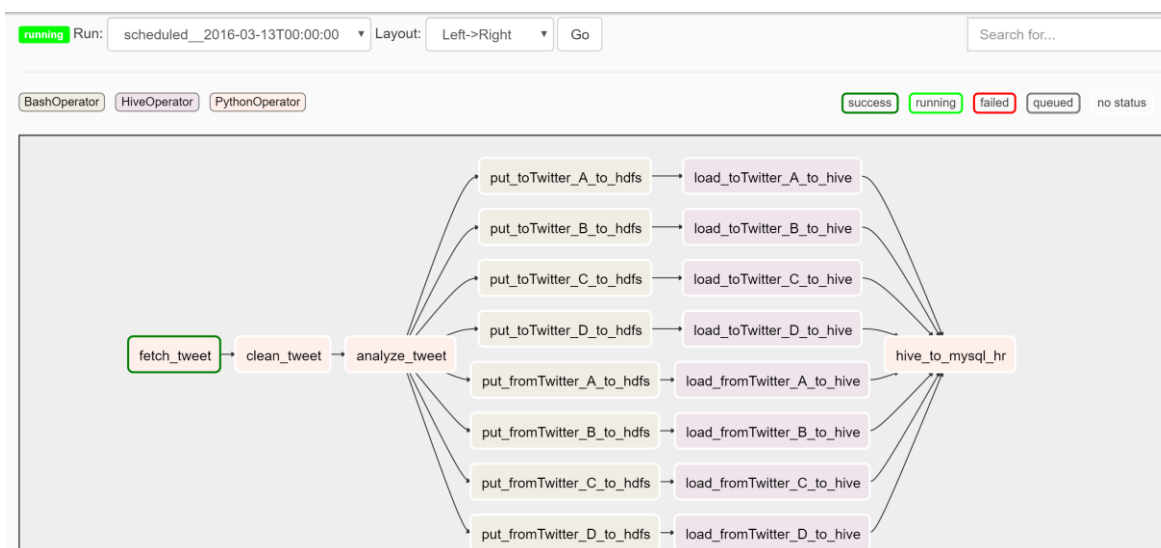


Figura 2.- DAG de Airflow con un flujo de trabajo para la extracción, transformación y almacenamiento (ETL) de mensajes en la red social Twitter.

3.2 ELASTICSEARCH

Es una herramienta, de software libre, que permite indexar y analizar en tiempo real grandes cantidades de datos de manera distribuida. Elasticsearch permite almacenar documentos (estructurados o no) e indexar todos los campos de estos documentos en tiempo casi real. Elasticsearch se basa en Lucene, pero expone su funcionalidad a través de una interfaz REST recibiendo y enviando datos en formato JSON y oculta mediante esta interfaz los detalles internos de Lucene. Esta interfaz permite que pueda ser utilizada por cualquier plataforma y no solo desde Java. En concreto puede usarse desde Python, .NET, PHP o

incluso desde un navegador con Javascript. Es persistente, es decir, que lo que indexemos en ella sobrevivirá a un reinicio del servidor.

3.3 KIBANA

La representación visual del dato es una tarea fundamental para obtener el valor oculto que tienen los datos. Un gran esfuerzo en un proyecto de tratamiento de datos, integración y depuración, etc., puede no servir para la toma de decisiones si finalmente los datos no se visualizan apropiadamente y el usuario debe poder sacar conclusiones con ellos.

Las buenas representaciones gráficas, deben cumplir una serie de características [3]:

- Señalar relaciones, tendencias o patrones

- Explorar datos para inferir nuevo conocimiento
- Facilitar el entendimiento de un concepto, idea o hecho
- Permitir la observación de una realidad desde diferentes puntos de vista
- Y permitir recordar una idea.

Se propone para la visualización de los datos Kibana. Es una herramienta de software libre,

perteneciente a Elastic, que nos permite hacer análisis, búsquedas, visualizar y explorar datos que se encuentran indexados en Elasticsearch. Kibana ofrece un interfaz muy potente para crear cuadros de mando a medida, con características como personalización, selección de rangos, drill down, además de poder compartirse y guardarse (Figura 3).

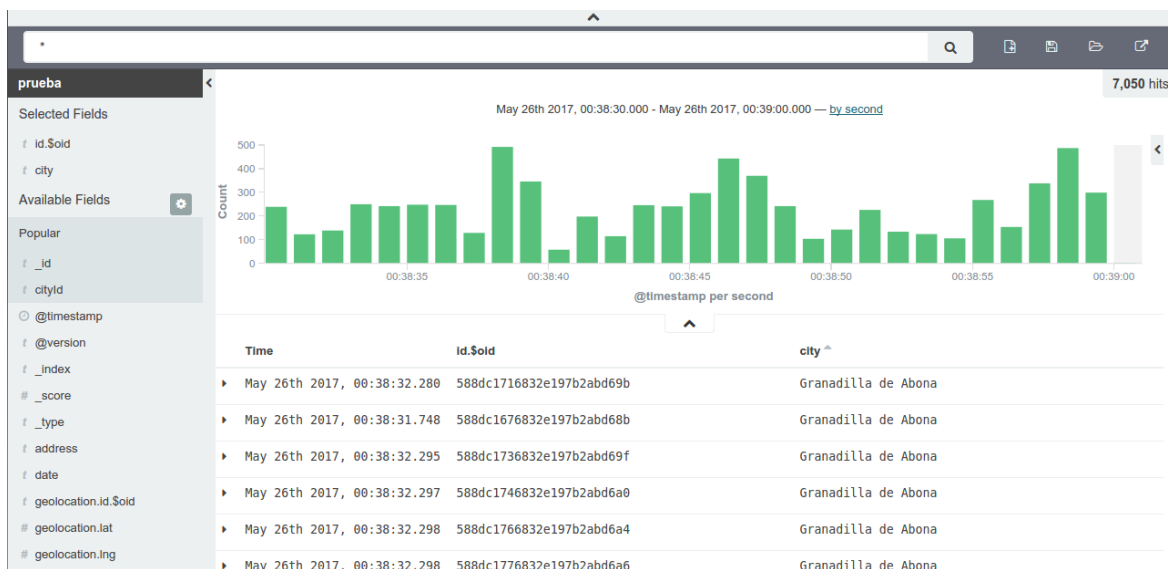


Figura 3.- Interface de Kibana

3.4 DOCKERS

Una de las cuestiones a resolver cuando nuestra aplicación está lista para desplegar en producción es cómo monitorizar su funcionamiento para poder actuar de manera rápida y efectiva ante cualquier incidencia. Hay que trabajar con elementos estructurados que nos permitan volver a estados estables cuando detectamos errores, además que nos facilite su despliegue. Para ello proponemos el despliegue de cada uno de los elementos de la pila AEK en contenedores.

Para el desarrollo de estos contenedores utilizamos la herramienta Docker, que empaqueta una pieza de software, su entorno de ejecución, sistema de ficheros, sus dependencias, etc. para ser ejecutadas por esta misma herramienta de forma aislada del resto del sistema. Este empaquetado es conocido como imagen, mientras que a una imagen en ejecución se la conoce como container. Se trata de un sistema de ejecución muy ligero ya que el container comparte el kernel del sistema operativo que hay por debajo, evitando necesitar un sistema operativo completo, como ocurre con las máquinas virtuales.

Para su funcionamiento Docker internamente está basado en LXC (Linux Containers) que utiliza

capacidades de Linux como son los *cgroups* y *namespaces* para que los procesos se ejecuten en entornos seguros. Está compuesto de 3 piezas principales que se conocen como Docker Engine:

- Docker Daemon: Entorno de ejecución de containers que corre sobre el anfitrión.
- Docker Client: Herramienta de línea de comando para comunicarse con Docker Daemon y que ejecuta los comandos de compilación, ejecución, etc.
- Rest API: Similar al Docker Client, permite controlar el Docker Daemon de manera remota.

Además del Docker Engine, existen otras herramientas que completan el ecosistema de Docker.

- Dockerfile: es un fichero que define el contenido de una imagen, así como qué procesos han de ejecutarse dentro de ella, si expone algo al exterior (volúmenes, puertos, etc.).
- Dockerhub Public Registry: Las imágenes, una vez construidas, se almacenan en el disco duro local. Para que otros usuarios las puedan usar, Docker ofrece un repositorio público de imágenes llamado Dockerhub. Creando una cuenta en este servicio y con un comando del

Docker Client, es posible subir y compartir las imágenes que hayamos creado con otros desarrolladores, así como descargar las de otros para tu uso personal.

- Docker-compose: es a la vez un fichero y una herramienta. Como fichero, define un conjunto de imágenes que van a trabajar de manera conjunta. Define cómo se comunican entre ellas, variables de entorno, volúmenes y

puertos a exponer. Como herramienta, lee la definición del fichero y la ejecuta sobre el Docker Engine, atendiendo a las interdependencias definidas.

Se debe implementar Docker para cada una de las aplicaciones que forman la pila. En la forja Github podemos encontrar la distribución del Docker para el gestor de flujos de trabajos Airflow (Figura 4).

ull-isaatc / **docker-airflow**
forked from puckel/docker-airflow

Unwatch 5 Star 0 Fork 211

Code Pull requests 0 Projects 0 Settings Insights

Docker Apache Airflow Edit

airflow docker dockerfile docker-compose Manage topics

131 commits 1 branch 19 releases 10 contributors

Branch: master New pull request Create new file Upload files Find file Clone or download

This branch is even with puckel:master. Pull request Compare

puckel committed on GitHub Update README.md Latest commit 9c647c8 10 days ago

File	Commit Message	Time Ago
config	Try Airflow branch 1.8-stable	5 months ago
script	Change REDIS_PASSWORD to set REDIS_PREFIX	2 months ago
.dockerignore	Initial commit	2 years ago
.gitignore	Initial commit	2 years ago
Dockerfile	Bump to 1.8.1	2 months ago
README.md	Update README.md	10 days ago
circle.yml	Bump to 1.8.1	2 months ago
docker-compose-CeleryExecutor.yml	Bump to 1.8.1	2 months ago
docker-compose-LocalExecutor.yml	Bump to 1.8.1	2 months ago

README.md

docker-airflow

build: passing docker build: passing

Figura 4.- <https://github.com/ull-isaatc/docker-airflow>

4 CONCLUSIONES

Actualmente hay una explosión de almacenamiento, análisis y visualización de big data en grandes repositorios de datos estructurados y sin estructura, comúnmente llamados lago de datos. Estos grandes volúmenes de datos requieren de nuevas técnicas de integración de datos y alineación de esquemas para hacer que los datos sean utilizables por sus consumidores y para descubrir las relaciones que vinculan su contenido. Sin embargo, actualmente no existe un enfoque sistemático para este tipo de procesamiento y gestión del lago de datos. En este trabajo, proponemos un marco para la monitorización, almacenamiento, análisis y visualización analítica de los datos existentes en un lago de datos. Datos procedentes de diferentes fuentes que se integran para ayudar a la toma de decisiones, encuentran el valor que encierra tal cantidad de datos.

Se define para la gestión de este big data una pila de servidores cuyas características deseadas es su gran escalabilidad y que sean de software libre. Se propone, como primer elemento, una herramienta de gestión de flujos de trabajo que periódicamente lance tareas para realizar tanto labores de monitorización de datos, para incluirlos en la lago de datos, como tareas de análisis de estos datos. Para dicho trabajo se utiliza Airflow, una herramienta que ejecuta tareas periódicamente, planificando el orden en el que se ejecutan las mismas. En medio de la pila nos encontramos con el repositorio de los datos, un servidor que provee un sistema de búsqueda de datos estructurados y no estructurados. Se propone el uso de Elasticsearch, que tiene la capacidad de multitenencia, con una interfaz web RESTful y con documentos JSON. Finalmente se hace uso de un visualizador que nos permita representar los datos de una forma amigable al usuario, para lo que se utiliza el servidor de Kibana.

Como propuesta para el mantenimiento de dicha estructura o pila AEK (Airflow-ElasticSearch-Kibana) se empaqueta cada servidor en un contenedor (concretamente utilizamos Docker) que nos permite el despliegue ágil del marco propuesto.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Fundación CajaCanarias a través del proyecto titulado “VITUIN: Vigilancia Turística Inteligente de Tenerife en Redes Sociales” nº2016TUR15.



Referencias

- [1] Natalia Miloslavskaya, Alexander Tolstoy, Big Data, Fast Data and Data Lake Concepts, Procedia Computer Science, Volume 88, 2016, Pages 300-305, ISSN 1877-0509
- [2] Laskowski, N. (2016). Data lake governance: A big data do or die. URL: <http://searchcio.techtarget.com/feature/Data-lake-governance-A-big-data-do-or-die> (access date 28/05/2016)
- [3] Edward Tufte, *The Visual Display of Quantitative Information*, Graphics Press USA; 2nd edition, 2001

SIMULADOR CARDIOVASCULAR PARA ENSAYO DE ROBOTS DE NAVEGACIÓN AUTÓNOMA

José Emilio Traver¹, Juan Francisco Ortega Morán², Inés Tejado¹, J. Blas Pagador²,

Fei Sun², Raquel Pérez-Aloe¹, Blas M. Vinagre¹, F. Miguel Sánchez Margallo²

¹ Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura, Avda. de Elvas, s/n, 06006 Badajoz, e-mail: {jetraver,itejbal,raquel,bvinagre}@unex.es

² Centro de Cirugía de Mínima Invasión Jesús Usón, Ctra. N-521 km 41, 10004 Cáceres, e-mail: {jfortega,jbpagador,feisun}@ccmijesususon.com

Resumen

Este artículo presenta un modelo de simulación del sistema cardiovascular en el entorno de Matlab/Simulink, más concretamente de la zona de mayor riesgo cardiovascular, la arteria carótida. Está basado en un modelo eléctrico del sistema que describe la dinámica de contracción del corazón, así como su carácter cíclico y autónomo. Como primer paso, este modelo se generaliza para contemplar también la dinámica de la arteria carótida izquierda. A partir de él, y haciendo una serie de equivalencias entre dominios, se obtiene un modelo hidráulico que emula el comportamiento del sistema cardiovascular en esa zona y que, a diferencia del anterior, no presenta carácter autónomo. Para el diseño del control, se hace uso de la estrategia de linealización por realimentación. Se incluyen simulaciones, tanto del modelo eléctrico completo como del hidráulico propuesto, para demostrar el correcto funcionamiento del simulador desarrollado. El objetivo final de este trabajo es la construcción de una plataforma de ensayo para robots nadadores tipo flagelo eucariótico y bacteriano de pequeñas dimensiones a partir del modelo hidráulico desarrollado que permita emular las condiciones en las que se encontrarían estos robots navegando por el sistema circulatorio humano.

Palabras clave: Sistema cardiovascular, modelo eléctrico, modelo hidráulico, linealización por realimentación, Simulink, plataforma de ensayo, robots de pequeñas dimensiones.

1. INTRODUCCIÓN

Las enfermedades cardiovasculares se consideran como la primera causa de defunción a nivel global, y la tendencia del número de incidencias de este tipo es creciente [11]. Esta circunstancia pone de manifiesto la gravedad de la situación, la necesidad de su estudio y el desarrollo de medios que permitan evaluar y mejorar su tratamiento. Como consecuencia de esta situación, son numerosos y conocidos los esfuerzos combinados de la comunidad médica e ingenieril [1] para el desa-

rollo de modelos y simuladores, conocidos como lazos de circulación Mock (MCLs, del término en inglés). Estos modelos permiten un ahorro en coste y tiempo, además de servir de herramientas para el diseño, evaluación y mejora del funcionamiento de dispositivos de asistencia ventricular [13, 6], prótesis de válvulas cardíacas [3] o emuladores del sistema circulatorio para aprendizaje y evaluación de herramientas de cateterismo.

El sistema cardiovascular (SCV) es un sistema relativamente complejo y son numerosos los modelos desarrollados para su investigación, así como las perspectivas desde las que han sido abordados. Sin embargo, a pesar de la abundante información que es posible encontrar en la literatura respecto al modelado del SCV [13, 6, 4, 18], ésta es escasa en lo que se refiere a tratar los problemas originados por la enfermedad de arteriosclerosis, concretamente en el oclusión (estenosis) de las arterias debido su engrosamiento [10]. Esto se encuentra motivado principalmente por tres razones: 1) las herramientas actuales se encuentran enfocadas principalmente a reducir los síntomas o eliminar las dolencias derivadas de la enfermedad, de forma concreta y localizada, sin la eliminación de los factores que la originan, como es el caso del uso de dispositivos de estabilización (stent) o cirugía de bypass; 2) recientes estudios avalan una mayor eficacia de los tratamientos farmacéuticos frente a las técnicas de tratamientos invasivos, además de ofrecer un tratamiento sistémico [10]; y 3) la ausencia de dispositivos capaces de tratar la enfermedad de forma sistémica. Sin embargo, a partir de la última década los avances tecnológicos han permitido el estudio de dispositivos dentro del campo de la robótica de pequeña escala, como aplicación de la nano y microrrobótica al ámbito médico [9].

En este contexto, el presente trabajo pretende recopilar los fundamentos teóricos necesarios para el desarrollo de un simulador hidráulico que permita emular la dinámica del SCV. Para ello, se partirá de un modelo eléctrico que describe la dinámica de contracción del corazón de acuerdo con la ley de Frank-Starling, así como su carácter cíclico y autónomo. Como primer paso, este modelo se generalizará para incluir también la dinámica de la

arteria carótida izquierda, que constituye la región con mayor recurrencia en problemas cardiovasculares, y más concretamente, en la formación de placas de ateroma. Basado en éste, se desarrollará un modelo hidráulico que, a diferencia del anterior, no presentará carácter autónomo y necesitará ser controlado para emular la dinámica cardiovascular. Se utilizará el método de linealización por realimentación para el diseño del control. Con ello se logrará independizar la dinámica del sistema de la caracterización de la ley de Frank-Starling, pudiendo así emular el comportamiento descrito por el modelo eléctrico. Ambos modelos, tanto el eléctrico completo como el hidráulico, se implementarán en el entorno Matlab/Simulink usando la herramienta Simscape para validarlos.

El objetivo final de este trabajo es la construcción de una plataforma experimental a partir del modelo hidráulico desarrollado para el ensayo de robots de pequeñas dimensiones, concretamente robots nadadores tipo flagelo eucariótico y bacteriano. Se pretende, pues, emular las condiciones en las que se encontrarían estos robots navegando por el sistema circulatorio humano. Cabe resaltar que en la literatura es posible encontrar modelos del SCV, principalmente eléctricos, de mayor complejidad que el aquí considerado. Sin embargo, no contemplan las arterias centrales, al contrario que los aquí considerados, y están enfocados a otros estudios.

El resto del documento está estructurado como sigue. La sección 2 resume el funcionamiento del SCV. La sección 3 describe y analiza un modelo eléctrico equivalente del SCV, lo extiende para incluir la dinámica de la arteria carótida izquierda, y comprueba su validez con simulaciones en Matlab. Basado en este modelo, la sección 4 presenta un modelo hidráulico que emula la dinámica del SCV. Finalmente, la sección 5 resume las principales conclusiones del trabajo.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA CARDIOVASCULAR

Con el objeto de poder realizar una correcta descripción y modelado del SCV, a continuación se resume el funcionamiento del órgano principal, así como la importancia de la red de distribución y su hemodinámica. Conviene tener presente en todo momento que se está describiendo un organismo vivo, y por lo tanto, es importante no olvidar la variabilidad de sus parámetros.

En términos sencillos, es posible describir el SCV como una red de distribución (vasos sanguíneos) que abastece de fluido (sangre) a una población por medio de una bomba (corazón). El corazón ge-

nera la presión necesaria para bombear la sangre a través del conjunto de vasos sanguíneos que recorren las células del cuerpo. En el flujo de sangre se distinguen dos etapas: 1) circulación sistémica o general, que es la encargada del transporte de sustancias y oxígeno, y 2) circulación pulmonar, responsable de la oxigenación de la sangre [8].

El corazón actúa como una bomba para cada circulación. Se encuentra constituido por una doble cámara aurícula-ventrículo, donde las aurículas actúan como cámara de precarga y los ventrículos hacen la función de bomba. Así mismo, presenta válvulas unidireccionales que impiden el reflujo entre cámaras (válvulas auriculoventriculares) y a la salida de los ventrículos (válvulas semilunares). La capacidad del corazón para generar el gradiente de presión necesario reside en su capacidad de contracción y la sucesión de fenómenos eléctricos y mecánicos ocurridos durante un latido, conocidos como ciclo cardíaco [8].

El ciclo cardíaco se divide en dos etapas claramente diferenciadas que ocurren de forma alternada: diástole (periodo de relajación) y sístole (periodo de contracción). Las manifestaciones físicas correspondientes a cada una de ellas se ilustran en la Figura 1, donde puede observarse la presión y los cambios de volumen registrados en la aurícula y ventrículo izquierdo (VI) para un conjunto de ocho etapas [8].

Esta dinámica no se preserva durante todo el sistema circulatorio, debido a su diversidad en morfologías, diámetros y composiciones. Por lo tanto, la oposición al flujo de sangre también es variable. La resistencia vascular, entendida como la fricción que experimenta la sangre con las paredes, depende principalmente de dos factores: la longitud y

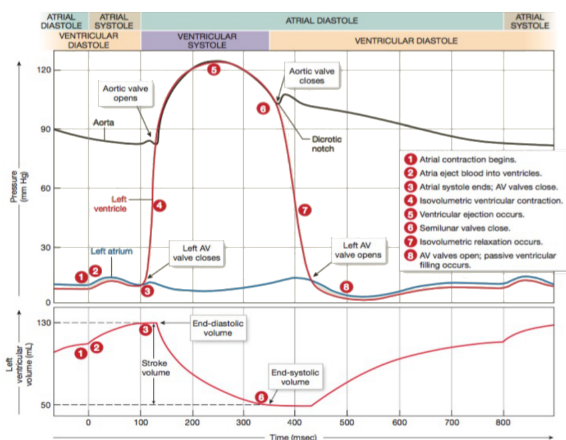


Figura 1: Relación de presiones en el VI durante el ciclo cardíaco para una frecuencia cardíaca de 75 latidos por minuto (lpm). Imagen extraída de [8].

el diámetro del vaso. Dicha resistencia es menor en las zonas vasculares (capilares) debido a que su sección total es superior a las zonas adyacentes al corazón (arterias y venas).

Respecto a la presión carótida, presenta ligeras diferencias en comparación con la ilustrada en la Figura 1: 1) existe un desfase de tiempo respecto a la presión sistólica, 2) la presión experimenta un ligero aumento a raíz de las ondas de presión reflejadas, y 3) la onda diacrótica se intensifica [10]. En cuanto al flujo, según las condiciones fisiológicas pueden darse diferentes comportamientos. Sin embargo, su comportamiento principal está caracterizado por un flujo positivo en un menor periodo de tiempo, seguido de un flujo negativo originado por el cierre de la válvula aórtica, pudiendo llegar incluso a producirse un segundo impulso de sangre durante la diástole ventricular motivado por el retroceso de la sangre en la aorta descendente.

Las repercusiones que presenta la aterosclerosis sobre el comportamiento cardiovascular son principalmente dos: la pérdida de elasticidad de las arterias y el estrechamiento de la luz del vaso (estenosis). La pérdida de elasticidad produce un aumento de las presiones máximas alcanzadas [10], así como la modificación del patrón de onda debido a que la reflexión de las ondas se producen con mayor rapidez. Por otro lado, la estenosis reduce el flujo de sangre.

3. MODELO ELÉCTRICO DEL SISTEMA CARDIOVASCULAR

Para desarrollar un modelo del SCV se ha optado por describir primero su comportamiento mediante estructuras eléctricas con un funcionamiento conceptual análogo.

A partir del modelo de Windkessel [16] y las modificaciones sugeridas en [18], el SCV puede ser analizado a través de un circuito eléctrico, como se muestra en la Figura 2 (sombreado naranja) [13]. En este modelo, la circulación sistémica y pulmonar quedan simplificadas a una resistencia periférica total (R_s) que considera la oposición de todas las arterias y venas, y un condensador que emula la elasticidad de los vasos sanguíneos, y con ello la capacidad de albergar sangre (C_s). La morfología destacada del cayado aórtico también se encuentra reflejada en el modelo a través de la resistencia R_c , así como las fuerzas inerciales que experimenta el flujo debido a su carácter pulsátil (L). Por otro lado, la dinámica del corazón es reducida a la parte izquierda y las correspondientes válvulas. La capacidad de contracción del VI, recogido por la ley de Frank-Starling, es considerada como un condensador variable ($C(t)$) [13, 15], mientras

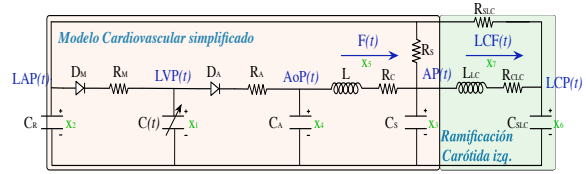


Figura 2: Modelo eléctrico del SCV (sombreado naranja) extendido a la arteria carótida común izquierda (sombreado verde).

que la aurícula izquierda es interpretada como un elemento pasivo de acumulación (C_s). En cuanto a las válvulas, son modeladas como un diodo no ideal, componente que permite identificar el control del flujo de sangre en función de la presión entre sus extremos [13, 4]. Además, la elasticidad de la válvula aórtica es caracterizada con un condensador (C_A) que recoge la dinámica de la onda diacrótica. Respecto al carácter cíclico del SCV, es logrado a través un circuito realimentado.

En segundo lugar, al sistema anterior se le incluye el modelo de las arterias centrales, concretamente de la arteria carótida común izquierda, de acuerdo con [18, 13] (ver el sombreado verde en la Figura 2). Como se ha comentado anteriormente, se elige este lecho vascular por su elevada recurrencia en presentar placas de ateroma [10]. El modelo completo se ha establecido en base a la distribución anatómica del sistema circulatorio y los criterios empleados para desarrollar el modelo de Windkessel de 4 elementos [16], donde la resistencia R_{CLC} modela de la oposición al flujo y la bifurcación de dicha arteria, mientras que R_{SLC} modela la resistencia de retorno al corazón. El elemento L_{LC} simboliza la inercia experimentada en gran medida por el flujo de la arteria aorta, provocando grandes variaciones del flujo. La capacidad C_{SLC} representa la elasticidad.

Una vez completado el esquema eléctrico que representa el funcionamiento cardiovascular, se extraen las relaciones matemáticas entre las diferentes variables hemodinámicas, atendiendo a la definición física de los componentes que constituyen el modelo eléctrico equivalente, salvo en el caso de los diodos y el componente que emula el VI que se explican a continuación. Los diodos son descritos según la siguiente función:

$$r(\xi) = \begin{cases} \xi, & \text{si } \xi \geq 0 \\ 0, & \text{si } \xi < 0 \end{cases} \quad (1)$$

mientras que su comportamiento resistivo viene determinado por la resistencia en serie asociada. Por otra parte, el condensador de capacidad variable $C(t)$ refleja la elasticidad durante la contracción del VI y es definida como la inversa de la

Tabla 1: Variables del modelo del SCV.

Variable	Abreviatura	Significado clínico (unidad)
$x_1(t)$	LVP(t)	Presión del ventrículo izquierdo (mmHg)
$x_2(t)$	LAP(t)	Presión de la aurícula izquierda (mmHg)
$x_3(t)$	AP(t)	Presión arterial (mmHg)
$x_4(t)$	AoP(t)	Presión aórtica (mmHg)
$x_5(t)$	F(t)	Flujo de sangre (ml/s)
$x_6(t)$	LCP(t)	Presión arteria carótida común izquierda (mmHg)
$x_7(t)$	LCF(t)	Flujo de sangre en la arteria carótida (ml/s)

elastancia $E(t) = \frac{1}{C(t)}$. La elastancia es el estado de contracción, que relaciona la presión ($LVP(t)$) y volumen ($LVV(t)$) del VI de acuerdo con la siguiente expresión [13]:

$$E(t) = \frac{LVP(t)}{LVV(t) - V_0}, \quad (2)$$

donde V_0 es el volumen de referencia, que se corresponde con el volumen ventricular teórico a una presión cero. La descripción empleada en este documento se basa en los estudios realizados en [15], donde describen la elastancia de una persona en un buen estado cardiovascular como

$$E_H = (E_{max} - E_{min})E_n(t_n) + E_{min}, \quad (3)$$

siendo E_{max} y E_{min} constantes relacionadas con el volumen máximo y mínimo diástole. El parámetro $E_n(t_n)$ es la elastancia normalizada, con $t_n = t/(0,2 + 0,15 \cdot 60/HR)$, donde HR es la frecuencia cardíaca. La elastancia normalizada, conocida como función de doble colina, viene dada por la siguiente ecuación:

$$E_n(t_n) = 1,55 \left(\frac{\left(\frac{t_n}{0,7} \right)^{1,9}}{1 + \left(\frac{t_n}{0,7} \right)^{1,9}} \right) \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{t_n}{1,17} \right)^{21,9}} \right) \quad (4)$$

Es necesario matizar que en (3) se realiza el escalado de la elastancia normalizada entre los valores E_{max} y E_{min} , ya que el valor normalizado presenta la misma morfología para un corazón sano o enfermo [17]. Las afecciones cardíacas son modeladas mediante la ponderación de (3) con el factor δ , con $0 < \delta \leq 1$ (el valor unitario corresponde a una persona sana).

Las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento del sistema se obtienen seleccionando las variables recogidas en la Tabla 1 y empleando la definición de los propios componentes, así como las leyes de tensiones y corrientes de Kirchoff.

Así, el estado x_1 es establecido a partir de la relación indicada en (2) y la relación entre el voltaje (V) y la corriente (I) en un condensador, es decir, $\frac{dV}{dt} = \frac{1}{C}I$, que resulta en:

$$x_1 = E(t)(LVV(t) - V_0), \quad (5)$$

donde $LVV(t) = \int (I_{D_M} - I_{D_A})dt$, siendo I_{D_M} e I_{D_A} las corrientes correspondientes a los diodos

Tabla 2: Parámetros del modelo del SCV.

Parámetro	Valor	Significado clínico
Resistencias		
R_S	1 (mmHg s / ml)	Resistencia periférica total.
R_{SLC}	10 (mmHg s / ml)	Resistencia periférica carótida común izquierda.
R_M	0,005 (mmHg s / ml)	Resistencia válvula mitral.
R_A	0,001 (mmHg s / ml)	Resistencia válvula aórtica.
R_C	0,0398 (mmHg s / ml)	Resistencia arteria aorta.
R_{CLS}	0,2 (mmHg s / ml)	Resistencia carótida común izquierda.
Capacidad		
C_R	8,8 (ml / mmHg)	Elasticidad aurícula izquierda.
C_S	1,33 (ml / mmHg)	Elasticidad sistémica.
C_A	0,08 (ml / mmHg)	Elasticidad válvula aórtica.
C_{LC}	0,09 (ml / mmHg)	Elasticidad carótida común izquierda.
Inductancia		
L_S	0,0005 (mmHg s ² / ml)	Inercia asociada a la arteria aorta.
L_{SLC}	0,03 (mmHg s ² / ml)	Inercia asociada a la carótida común izquierda.
Ventrículo izquierdo		
E_{max}	2 (mmHg/ml)	Contractilidad máxima.
E_{min}	0,006 (mmHg/ml)	Contractilidad mínima.
V_0	10 (ml)	Volumen del ventrículo izquierdo a presión cero.
HR	75 (lpm)	Frecuencia cardíaca.

D_M y D_A , respectivamente. Por tanto, la derivada del estado x_1 es

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{C(t)}(-\dot{C}(t)x_1 + \frac{1}{R_M}r(x_2 - x_1) - \frac{1}{R_A}r(x_1 - x_4)). \quad (6)$$

Las derivadas de los demás estados, como se muestra a continuación, son deducidas directamente a partir de las leyes mencionadas:

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{C_R} \left(- \left(\frac{1}{R_S} + \frac{1}{R_{SLC}} \right) x_2 + \right. \quad (7)$$

$$\left. \frac{1}{R_S}x_3 + \frac{1}{R_{SLC}}x_6 - \frac{1}{R_M}r(x_2 - x_1) \right)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{C_S} \left(\frac{1}{R_S}x_2 - \frac{1}{R_S}x_3 + x_5 - x_7 \right) \quad (8)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{C_A} \left(-x_5 + \frac{1}{R_A}r(x_1 - x_4) \right) \quad (9)$$

$$\dot{x}_5 = \frac{1}{L} (-x_3 + x_4 - R_Cx_5) \quad (10)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{C_{SLC}} \left(\frac{1}{R_{SLC}}x_2 - \frac{1}{R_{SLC}}x_6 + x_7 \right) \quad (11)$$

$$\dot{x}_7 = \frac{1}{L_{LC}} (x_3 - x_6 - R_{LC}x_7) \quad (12)$$

Se define así un sistema de marcado carácter no lineal a causa de la función descrita en (1) y autónomo debido al carácter cíclico de los términos $\dot{C}(t)$ y $1/C(t)$. De esta forma se describe la dinámica cardiovascular de manera continua.

Los valores utilizados para definir las variables del modelo son recogidos en la Tabla 2, los cuales se han extraído de [13, 18]. La magnitud de los parámetros se expresa en unidades de referencias híbridas, que permiten obtener la información en el sistema de unidades más utilizado a nivel clínico.

Con el propósito de su validación, el modelo eléctrico se ha implementado con la herramienta Simscape Electronics de Matlab/Simulink, y mediante la programación de las ecuaciones anteriores en Matlab. La dinámica cardiovascular simu-

lada se representa en la Figura 3, donde se observan las formas de ondas hemodinámicas para un adulto con una frecuencia cardíaca de 75 latidos por minuto (lpm). Para este caso particular, las presiones arteriales sistólica y diastólica son 112 y 77 mmHg, la presión media arterial (calculada como $MAP = (SAP + 2DAP)/3$) es 92 mmHg, y el gasto cardíaco es de 5,90 l/min para una fracción de eyección de 78,71 ml/latido. Las presiones sistólicas y diastólicas del VI son 117 y 7 mmHg, los volúmenes telesistólicos y telediastólico son 67 y 137 ml, y la presión de la aurícula varía entre 7–12 mmHg durante el ciclo cardíaco. Estos resultados, además de los obtenidos por otros medios de verificación (omitidos por cuestiones de espacio), son consistentes con los parámetros hemodinámicos reales [8, 7, 5, ?, 12], demostrando así que el modelo ofrece unos resultados acordes a la realidad.

Por último, la Figura 4 muestra las formas de onda de la presión y el flujo en la carótida común izquierda, donde se identifican las principales características que la definen [10]: 1) desfase de tiempo respecto a la presión arterial, 2) ligero aumento de la presión, 3) mayor acentuación de la onda diacrótica, y 4) flujo negativo y segundo impulso de sangre en diástole ventricular.

4. MODELO HIDRÁULICO PARA ROBOTS NADADORES

Con el objeto de trasladar el modelo eléctrico descrito a un modelo hidráulico que permita el ensayo de robots nadadores, se establecerán las equivalencias entre componentes eléctricos e hidráulicos, así como las consideraciones pertinentes que permitan adaptar la dinámica descrita a una implementación física. Como se ha visto, los componentes eléctricos utilizados han sido resistencias, condensadores e inductancias, cuyo comportamiento hidráulico puede ser modelado por cambios de sección, depósitos o tuberías de gran longitud [2],

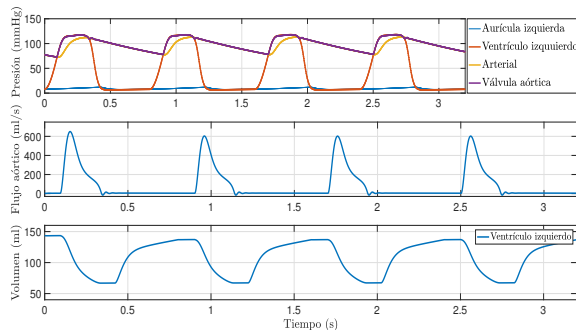


Figura 3: Resultados del modelo eléctrico.

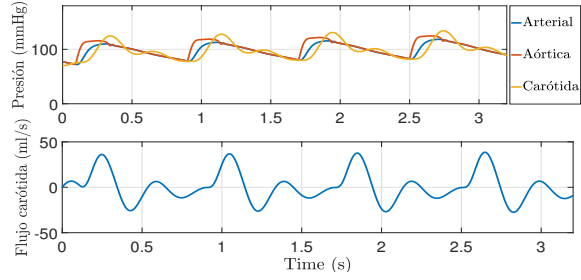


Figura 4: Resultados relativos a la arteria carótida común izquierda (a partir del modelo eléctrico).

respectivamente, como se detalla a continuación. Respecto a los diodos, son sustituidos por válvulas unidireccionales.

La resistencia hidráulica es directamente equivalente a una resistencia eléctrica y se denotarán más adelante como R_{H_i} , donde i se refiere al subíndice usado en el modelo eléctrico; esta misma nomenclatura se utilizará para el resto de elementos. Un condensador en términos hidráulicos es un depósito, cuya constante de capacidad equivalente es identificada como $C_H = \frac{A}{\rho g}$, donde A es la sección del depósito, ρ es la densidad del fluido y g , la gravedad. Respecto a la inductancia eléctrica, es similar a la hidráulica, pudiendo expresarse de la siguiente forma $L_H = \frac{l_p}{A}$, donde l es la longitud de la tubería [2].

Respecto la contracción muscular del VI, el modelo eléctrico consideraba un condensador de capacidad variable para satisfacer la ley de Frank-Starling y así describir la actividad muscular del VI como (5). Para el modelo hidráulico es emplear una bomba, concretamente en este trabajo se utilizará una bomba de pistón [4], que junto con una adecuada estrategia de control, permitirá emular el funcionamiento del corazón de acuerdo con la ley indicada. Este tipo de actuador se puede interpretar como un depósito de volumen variable en función de la posición del pistón.

Analizando la dinámica de la bomba como un depósito de volumen variable, se obtiene que la variación de presión es función de los caudales de entrada, salida y la variación de volumen causada por el desplazamiento del pistón. Por lo tanto, la derivada de x_1 para el modelo hidráulico se define como:

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{C_p}(Q_i - Q_o - A_p \nu), \quad (13)$$

donde C_p define la capacidad del pistón, Q_i y Q_o son los caudales de entrada y salida, respectivamente, A_p es la sección del pistón (véase la Figura 5), y $\nu = \dot{x}_p$ se corresponde con la velocidad de desplazamiento del pistón de acuerdo al criterio de signos indicado en la figura.

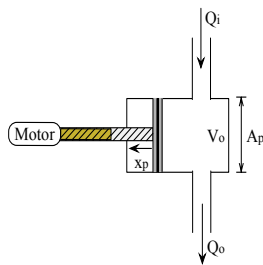


Figura 5: Esquema del VI emulado mediante una bomba de pistón.

Teniendo en cuenta las equivalencias descritas, el esquema eléctrico presentado en la Figura 2 se corresponde con el mostrado en la Figura 6. Por su parte, el modelo matemático anteriormente descrito viene dado en este caso como sigue:

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{C_p} \left(\frac{1}{R_{H_M}} r(x_2 - x_1) \right) \quad (14)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{C_{H_R}} \left(- \left(\frac{1}{R_{H_S}} + \frac{1}{R_{H_{SLC}}} \right) x_2 + \frac{1}{R_{H_S}} x_3 + \frac{1}{R_{H_{SLC}}} x_6 - \frac{1}{R_{H_A}} r(x_1 - x_4) - \frac{A_p}{C_p} \nu \right) \quad (15)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{C_{H_S}} \left(\frac{1}{R_{H_S}} x_2 - \frac{1}{R_{H_S}} x_3 + x_5 - x_7 \right) \quad (16)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{C_{H_A}} \left(-x_5 + \frac{1}{R_{H_A}} r(x_1 - x_4) \right) \quad (17)$$

$$\dot{x}_5 = \frac{1}{L_H} (-x_3 + x_4 - R_{HC} x_5) \quad (18)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{C_{HSLC}} \left(\frac{1}{R_{HSLC}} x_2 - \frac{1}{R_{HSLC}} x_6 + x_7 \right) \quad (19)$$

$$\dot{x}_7 = \frac{1}{L_{H_{LC}}}(x_3 - x_6 - R_{H_{LC}}x_7) \quad (20)$$

donde la dinámica de \dot{x}_1 es la impuesta por la bomba de pistón, y la derivada de los demás estados se corresponde con las del modelo eléctrico a través de las equivalencias descritas. El modelo obtenido es un sistema no lineal y no autónomo

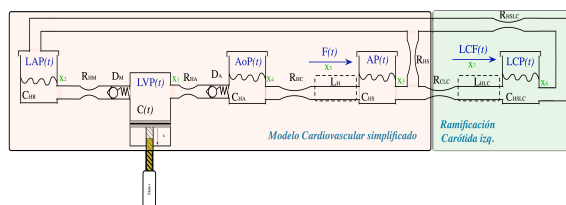


Figura 6: Modelo hidráulico del SCV.

cuya entrada ν modifica la presión en la cámara del pistón (x_1).

A diferencia del modelo eléctrico, éste no presenta un carácter autónomo como consecuencia del tipo de mecanismo escogido para implementar la contracción del VI, motivo por el cual se hace necesario aplicar una estrategia de control que regule la velocidad de desplazamiento del pistón para así emular las variaciones de presión del VI.

4.1. Diseño del controlador

La estrategia de control utilizada para el sistema anterior se basa en una linealización por realimentación, método que permite realizar una transformación algebraica entre la entrada y salida deseada e interpretar el sistema como lineal, y por lo tanto, aplicar cualquier técnica de control lineal, reduciendo así la complejidad del control [14].

Para linealizar la relación (14) se puede tomar la variable de entrada ν del sistema como:

$$\nu = -\frac{C_p}{A_p} \left(u - \frac{1}{C_p} \left(\frac{r(x_2 - x_1)}{R_{H_M}} - \frac{r(x_1 - x_4)}{R_{H_A}} \right) \right), \quad (21)$$

que permite considerar una relación lineal entre la salida del sistema ($y = x_1$) y la variable u , siendo u la entrada equivalente de la dinámica linealizada, que es interpretada de orden relativo uno al obtener una relación de integración entre la salida y entrada equivalente ($\dot{y} = u$). Considerando esta nueva relación lineal, se establece como criterio de diseño la siguiente ley de control:

$$u = \dot{y}_d + \lambda e, \quad (22)$$

donde y_d es la salida deseada, e es el error definido de la forma $e = y_d - y_1$ y $1/\lambda$ es la constante de tiempo del error.

Finalmente, sustituyendo (22) en (21), se obtiene

$$\nu = -\frac{C_p}{A_p} \left(\dot{y}_d - \frac{1}{C_p} \left(\frac{r(x_2 - x_1)}{R_{H_M}} - \frac{r(x_1 - x_4)}{R_{H_A}} \right) + \lambda e \right), \quad (23)$$

que permite alcanzar la referencia de acuerdo con la ley de control establecida. Es necesario destacar el valor positivo del parámetro λ para asegurar la estabilidad del sistema, siendo mayor la velocidad del sistema cuanto mayor sea su valor.

Conviene mencionar que, en la simulación, las variables \dot{y}_d y y_d son proporcionadas por el modelo eléctrico, mientras que las demás son obtenidas por medición del emulador hidráulico. Es necesario destacar que mediante el modelo y estrategia de control propuesta se logra independizar la dinámica emulada de la caracterización de la contracción ventricular (ley de Frank–Starling), pudiendo utilizar datos reales como referencia. La

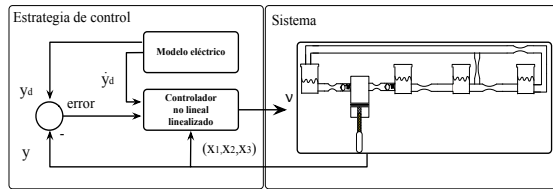


Figura 7: Diagrama de bloques de la estrategia de control para el modelo hidráulico del SCV.

Figura 7 muestra un diagrama de bloques de la estrategia de control empleada.

Para verificar la estrategia de control propuesta, así como el propio modelo desarrollado, el modelo hidráulico es implementado con la herramienta Simscape Fluids de Matlab/Simulink. Las tuberías que conectan los diferentes depósitos y válvulas se establecen con un diámetro de 2 pulgadas (diámetro suficiente para asegurar un libre movimiento de los robots nadadores), sin que éste se encuentre limitado por las restricciones de contorno. Respecto a las dimensiones de los depósitos, su sección y el valor inicial del fluido, son obtenidos a partir de las equivalencias indicadas anteriormente y los valores de la Tabla 2. Además, con el objeto de lograr escalar a nivel macroscópico los fenómenos microscópicos producidos a causa de la interacción de los microrrobots con la hemodinámica cardiovascular, el fluido a utilizar será aceite 30W, cuya viscosidad es 109,408 cSt y densidad $852,5 \text{ kg/m}^3$ a 35° , características que, para robots de pequeñas dimensiones, permiten emular las condiciones en las que se encontrarían sujetos estos robots en el sistema circulatorio humano.

La Figura 8 muestra los resultados de simulación correspondientes al modelo hidráulico con el control. Como se puede observar, éstos son similares a los obtenidos con el modelo eléctrico, por lo que este modelo se puede considerar válido para emular la dinámica del SCV. El error cuadrático medio normalizado (NRMSE) de los resultados obtenidos en la variable de control con este modelo con res-

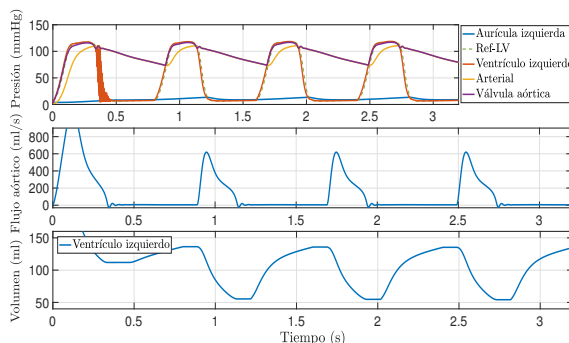


Figura 8: Resultados del modelo hidráulico.

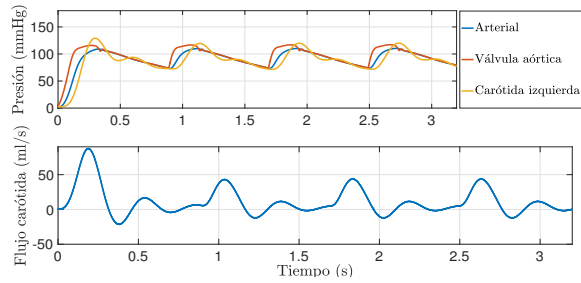


Figura 9: Resultados relativos a la arteria carótida común izquierda (modelo hidráulico).

pecto al eléctrico es de 1,90 %, que evidentemente se puede considerar despreciable y al mismo tiempo admisible considerando la variabilidad de los parámetros hemodinámicos, mientras que el desfase es de 10,50 ms.

Respecto a la presión en la carótida izquierda común y el flujo, representados en la Figura 9, también muestran el comportamiento esperado.

5. CONCLUSIONES

Este artículo ha presentado un modelo de simulación del sistema cardiovascular (SCV) en el entorno de Matlab/Simulink, más concretamente de la zona de mayor riesgo cardiovascular, la arteria carótida. Está basado en un modelo eléctrico que contempla la dinámica de contracción del corazón de acuerdo con la ley de Frank-Starling y su carácter cíclico y autónomo. Así mismo, se ha extendido el modelo a la dinámica de las arterias centrales, concretamente a la arteria carótida izquierda, con motivo del elevado índice de mortalidad que produce la enfermedad de arteriosclerosis en este vaso sanguíneo.

A partir de él, y haciendo una serie de equivalencias entre dominios, se ha desarrollado un modelo hidráulico del SCV que emula el comportamiento del sistema en esa zona y que, a diferencia del anterior, no presentaba carácter autónomo. Es por ello que se ha utilizado la estrategia de linealización por realimentación para diseñar el control para este modelo. Con el propósito de validarlos, se han implementado ambos modelos en el entorno Matlab/Simulink mediante la herramienta Simscape. Los resultados de simulación obtenidos, tanto con el modelo eléctrico extendido como con el hidráulico propuesto, han demostrado el correcto funcionamiento al compararlos con los recogidos en la bibliografía de ambos.

Como trabajo futuro, se plantea realizar una verificación cuantitativa del comportamiento hemodinámico de la arteria carótida común izquierda,

el estudio de diferentes estrategias de control independientes del modelo eléctrico y la construcción física del modelo hidráulico desarrollado como plataforma de ensayo para robots nadadores tipo flagelo eucariótico y bacteriano de pequeñas dimensiones que permita emular las condiciones en las que se encontrarían estos robots navegando por el sistema circulatorio humano.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por Fondos FEDER (Programa Operativo FEDER de Extremadura 2014-2020), a través de la Ayuda a Grupos de la Junta de Extremadura con número de expediente GR15178, y el Ministerio de Economía y Competitividad, a través del proyecto con referencia DPI2016-80547-R.

Referencias

- [1] H.R. Arabnia and Q.N. Tran. Emerging trends in applications and infrastructures for computational biology, bioinformatics, and systems biology: Systems and applications. *Emerging Trends in Computer Science and Applied Computing*. Elsevier Science, 2016.
- [2] D. K. Chaturvedi. *Modeling and simulation of systems using MATLAB and Simulink*. CRC Press, 2009.
- [3] L. P Dasi, H. A. Simon, P. Sucosky, and A. P. Yoganathan. Fluid mechanics of artificial heart valves. *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology*, 36(2):225–237, 2009.
- [4] K. Gwak, H. D. Kim, and C. Kim. Feed-back linearization control of a cardiovascular circulatory simulator. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 23(5):1970–1977, 2015.
- [5] Edwards Lifesciences. Normal hemodynamic parameters and laboratory values, 2017.
- [6] Y. Liu, P. Allaire, Y. Wu, H. Wood, and D. Olsen. Construction of an artificial heart pump performance test system. *Cardiovascular Engineering*, 6(4):151–158, 2006.
- [7] LiDCO Ltd. Normal hemodynamic parameters, 2017.
- [8] F. Martini, J.L. Nath, and E.F. Bartholomew. *Fundamentals of Anatomy & Physiology*. Benjamin-Cummings Publishing Company, 2015.
- [9] B. J. Nelson, I. K. Kaliakatsos, and J. J. Abbott. Microrobots for minimally invasive medicine. *Annual review of biomedical engineering*, 12:55–85, 2010.
- [10] W. Nichols, M. O'Rourke, and C. Vlachopoulos. *McDonald's Blood Flow in Arteries, Sixth Edition: Theoretical, Experimental and Clinical Principles*. CRC Press, 2011.
- [11] World Health Organization. Cardiovascular diseases, 2016.
- [12] H. Priebe and K. Skarvan. *Cardiovascular physiology*. BMJ Publishing Group, 1995.
- [13] M. A. Simaan. *Rotary Heart Assist Devices*, pages 1409–1422. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [14] J.J.E. Slotine and W. Li. *Applied Nonlinear Control*. Prentice-Hall International Editions. Prentice-Hall, 1991.
- [15] N. Stergiopulos, J. Meister, and N. Westerhof. Determinants of stroke volume and systolic and diastolic aortic pressure. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 270(6):H2050–H2059, 1996.
- [16] N. Westerhof, J. Lankhaar, and B. E. Westerhof. The arterial windkessel. *Medical & biological engineering & computing*, 47(2):131–141, 2009.
- [17] N. Westerhof, N. Stergiopulos, and M. Noble. *Snapshots of hemodynamics: an aid for clinical research and graduate education*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [18] Y. Yu, J. R. Boston, M. A Simaan, and J. Antaki. Estimation of systemic vascular bed parameters for artificial heart control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 43(6):765–778, 1998.

PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN BASADA EN CONTROL PREDICTIVO PARA PLANTAS TERMOSOLARES

M.J. Vasallo, J.M. Bravo, E.J. Cojocarú y M.E. Gegúndez

Departamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas Informáticos y Automática, Universidad de Huelva
emails: manuel.vasallo@diesia.uhu.es, caro@uhu.es, emiliangelu.cojocarú@alu.uhu.es, gegundez@uhu.es

Resumen

Se presenta una estrategia basada en control predictivo para resolver la planificación de la producción en plantas termosolares con almacenamiento térmico participando en el mercado diario de electricidad. Mediante esta estrategia, la producción de electricidad es actualizada regularmente haciendo uso del estado actual de la planta y de las más recientes predicciones para el precio de la energía y el recurso solar. La estrategia propuesta se aplica, en un contexto de simulación, a una planta basada en colectores cilindro-parabólicos de 50 MW con almacenamiento térmico bajo las hipótesis de predicción perfecta de precios y participación en el mercado diario español. Se ha analizado un caso de estudio basado en un periodo de cuatro meses con el propósito de abarcar una gran variedad de condiciones meteorológicas. Se han empleado valores reales para los precios de la energía, los costes de penalización, el recurso solar y su predicción. Los resultados muestran una mejora económica significativa frente a la tradicional estrategia a un día vista.

Palabras clave: Operación óptima de sistemas de potencia. Auto-programación de la producción. Integración en el mercado de la energía. Control predictivo basado en modelo. Modelado y simulación de sistemas de potencia.

1 INTRODUCCIÓN

La energía solar térmica de concentración (CSP, *concentrating solar power*) es una prometedora tecnología que ha despertado mucho interés en países como España y Estados Unidos, donde su desarrollo ha sido promovido gracias a políticas de subsidios. El interés en la tecnología CSP se basa en su carácter semi-gestionable cuando disponen de almacenamiento térmico (TES, *thermal energy storage*) y/o sistemas de respaldo basados en combustibles fósiles. Esta característica facilita su participación en el mercado eléctrico gracias a, entre otros factores, su capacidad para trasladar la producción hacia las horas con precios más al-

tos. Es posible, por tanto, plantear el problema de la planificación óptima de la producción (también llamada *auto-programación óptima*). En un mercado desregularizado, los propietarios de las plantas de potencia tienen por objetivo maximizar sus beneficios a partir de las ventas de energía. Por otra parte, deben ofrecer al mercado su programa diario de producción con antelación. En consecuencia, se necesitan predicciones de precios de la energía y meteorológicas (en caso de productores de energía renovable) para resolver el problema de optimización.

Uno de los primeros trabajos sobre operación óptima en plantas CSP es [11]. Se utilizaron dos modelos, la herramienta SAM [2] y un modelo de optimización basado en programación lineal entera mixta (MILP, *mixed integer linear programming*). Otros ejemplos con planteamientos MILP pueden encontrarse en [12] and [6].

Como consecuencia de errores en la predicción de irradiancia directa normal (DNI, *direct normal irradiance*), los propietarios de plantas CSP corren el riesgo de sufrir penalizaciones económicas por desvíos respecto al programa comprometido con el mercado. Con objeto de reducir el mencionado riesgo, los autores de este trabajo propusieron en [13] una estrategia de control predictivo (MPC, *model-based predictive control*) basada en programación entera mixta (MIP). Esta estrategia fue usada para la reprogramación de la producción y para el desarrollo del programa para el día siguiente. El control MPC es una estrategia ampliamente extendida en la industria y en el mundo académico dada su habilidad para tratar con modelos dinámicos y restricciones complejas (ver [10, 4]).

Este trabajo se inspira en la siguiente cuestión: ¿cuál es el impacto económico producido al usar la estrategia MPC en la auto-programación de plantas CSP? En este sentido, se ha desarrollado y probado una versión económica de la estrategia a partir del enfoque MPC general presentado en [13]. Esta versión se basa en definir una función de coste donde la información sobre precios y costes de penalización se ha añadido con objeto de establecer un seguimiento económicamente óptimo

del programa comprometido. De esta forma, la estrategia MPC busca compensar, al menos parcialmente, la penalización por desvíos mediante el incremento de los ingresos. La estrategia propuesta se aplica, en un contexto de simulación, a una planta basada en colectores cilindro-parabólicos de 50 MW con almacenamiento térmico bajo las hipótesis de predicción perfecta de precios y participación en el mercado diario español.

En la Sección 2 se describe de forma genérica la estrategia MPC propuesta. En la Sección 3 se describen el caso de estudio y sus resultados. Las conclusiones se recogen en la Sección 4.

2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ESTRATEGIA MPC DESARROLLADA

Se asume la participación en el mercado diario de electricidad y la imposibilidad del productor de influir en los precios (dado su pequeño volumen de producción). El objetivo de la estrategia MPC es doble: 1) el seguimiento periódico y conveniente desde el punto de vista económico del programa comprometido con el mercado y 2) el desarrollo del programa óptimo de producción para el día siguiente en el momento previsto para ello. Este doble objetivo requiere que la ventana deslizante del MPC esté compuesta de dos intervalos de tiempo (ver Fig. 1): el intervalo para el seguimiento del programa comprometido (IS) y el intervalo para la generación del nuevo programa (INP). La reprogramación llevada a cabo por la estrategia MPC tiene por objeto el seguimiento durante el intervalo IS del programa comprometido. Al mismo tiempo debe tenerse en cuenta la maximización de los ingresos futuros dentro del intervalo INP. En el instante previsto para ello, el perfil de producción obtenido para el intervalo INP es entregado al mercado como plan de producción para el próximo día. A continuación se definen algunas variables y parámetros relacionados con la ventana deslizante:

- $t(i) = i\Delta t_w$ donde $i = 0, 1, \dots$ son los instantes de tiempo en los que el control MPC genera salidas. El instante inicial de la ventana deslizante cuando esta está en la posición i es referido como $t(i)$. El caso $i = 0$ se refiere al instante 0.0h del día actual D. Δt_w es el paso de actualización del control MPC.
- $t_{schedule_del}$ es la hora límite durante el día D a la que hay que entregar el programa de producción para el día D+1. Esta hora depende del mercado de cada país.
- $t_{schedule_end}$ es el instante final del plan de

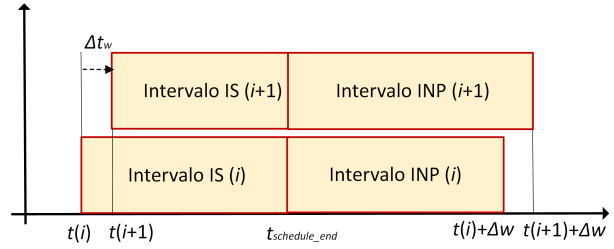


Figura 1: Ventana deslizante de la estrategia MPC

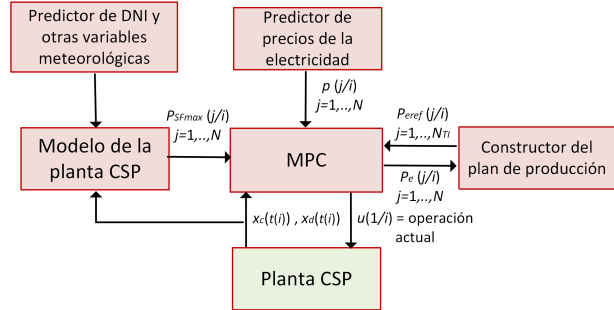


Figura 2: Diagrama de bloques de la estrategia MPC

producción comprometido. Si el instante actual no supera $t_{schedule_del}$, $t_{schedule_end}$ es 24.0h del día D. En caso contrario, $t_{schedule_end}$ es 24.0h del día D+1 porque el nuevo plan ya ha sido entregado.

- Δw es la longitud de la ventana deslizante.

Los extremos de los intervalos IS e INP pueden observarse en la Fig. 1, en coherencia con las anteriores definiciones. Obsérvese que la longitud de la ventana deslizante es constante, no así la de ambos intervalos.

Cuando $t(i) = t_{schedule_del}$, el programa de producción resuelto por el control MPC para el intervalo INP hasta las 12.0h del día D+1 puede entregarse como plan de producción para ese día.

La Fig. 2 muestra el diagrama de bloques del control MPC. En cada posición i de la ventana deslizante, el control MPC recibe la siguiente información:

1. El valor actual del estado continuo de la planta ($x_c(t(i))$), por ejemplo el nivel de energía del almacenamiento y el estado térmico del campo solar (*solar field*, SF).
2. El valor actual del estado discreto de la planta ($x_d(t(i))$), por ejemplo las fases de operación en SF, TES o turbina.

3. Predicciones del precio de la energía realizadas el instante $t(i)$ ($p(j/i)$, para $j = 1, \dots, N$), donde j indica cada paso en el modelo MPC, $N = \Delta w / \Delta t_o$ es el número de pasos en la ventana deslizante y Δt_o es el paso del modelo MPC expresado en horas.
4. Predicciones realizadas el instante $t(i)$ para el valor medio de la máxima potencia térmica disponible en SF ($P_{SFmax}(j/i)$, para $j = 1, \dots, N$). El término 'máximo' se añade para indicar que un desenfoco parcial de los colectores del SF puede conllevar un decremento de la potencia disponible. Un modelo de la planta, predicciones para DNI y otras variables meteorológicas, y las condiciones iniciales $x_c(t(i))$ y $x_d(t(i))$ son elementos usados para generar estas predicciones.
5. Plan de producción comprometido aún por ejecutar ($P_{eref}(j/i)$, para $j = 1, \dots, N_{TI}$), expresado en valores medios brutos de potencia eléctrica, donde $N_{TI} = (t_{schedule_end} - t(i)) / \Delta t_o$ es el número de pasos en el intervalo IS.

Como resultado de la optimización en la posición i , se generan las siguientes salidas:

1. Variables de decisión ($u(j/i)$, para $j = 1, \dots, N$). Sólo las variables de decisión $u(1/i)$ se aplican en la planta como es habitual en el control MPC.
2. Valores medios brutos de la potencia eléctrica generada por la turbina calculada en el instante $t(i)$ ($P_e(j/i)$, para $j = 1, \dots, N$). Cuando $t(i) = t_{schedule_del}$, el nuevo plan de producción se construye con los valores dentro del intervalo INP hasta las 24.0h del día D+1 ($P_{eref}(j/i) = P_e(j/i)$, para $j = N_{TI} + 1, \dots, N'_{TI}$, donde $N'_{TI} = N_{TI} + 24 / \Delta t_o$ es el nuevo número de pasos del intervalo INP).

La función objetivo a minimizar se expresa mediante la ecuación (1)

$$\begin{aligned}
 J(i) = & -\Delta t_o \sum_{j=1}^{N_{TI}} [p(j/i)P_{enet}(j/i) \\
 & - \phi(j/i)(P_{erefnet}(j/i) - P_{enet}(j/i)) - f_{cost}(\cdot)] \\
 & - \Delta t_o \sum_{j=N_{TI}+1}^N [p(j/i)P_{enet}(j/i) - f_{cost}(\cdot)] \\
 & - s(E(N+1/i))
 \end{aligned} \tag{1}$$

donde $\phi(j/i)$ es una estimación del coste de penalización por kWh de desviación durante la hora

j , $P_{enet}(j/i)$ es la potencia eléctrica neta generada por la turbina, $P_{erefnet}(j/i)$ es la potencia eléctrica neta comprometida, $f_{cost}(\cdot)$ representan los costes de generación y $s(E(N+1/i))$ es un elemento de valor terminal aplicado al nivel final de energía en TES. Nótese que la función $-J(i)$ representa la suma total de beneficios a lo largo de la ventana deslizante. En este trabajo se asume que la producción de electricidad no supera el valor comprometido. En consecuencia, el término $\phi(j/i)$ sólo hace referencia a desvíos negativos.

3 CASO DE ESTUDIO

En esta sección, la estrategia MPC propuesta en este trabajo se aplica, en un contexto de simulación, a una planta basada en colectores cilindro-parabólicos de 50 MW con almacenamiento térmico. Además, dicha estrategia se compara con una estrategia de planificación a día vista (*day-ahead scheduling*, DAS). La estrategia MPC usa el modelo MIP-MPC (ver Subsección 3.1), replanificación horaria, predicción solar a corto plazo actualizada cada hora y realimentación horaria del estado de la planta. La estrategia DAS se caracteriza por lo siguiente:

1. El plan para el día D+1 se genera el instante $t_{schedule_del}$ del día D. En este instante, las condiciones iniciales para el día D+1 se estiman empleando el estado actual de la planta, la predicción a un día vista y el plan de producción comprometido aún por ejecutar.
2. El plan de producción es ejecutado sin ninguna replanificación. Es decir, la producción cada hora es el valor máximo posible que no supere el valor comprometido.

El modelo de optimización empleado por la estrategia DAS es referido en este trabajo como modelo MIP-DAS (ver Subsección 3.1). La tabla 1 resume toda la información sobre las estrategias de planificación estudiadas y sus modelos de optimización.

La planta CSP analizada en este caso de estudio se basa en el modelo presentado en [5], y también usado en [13], que describe la planta *Andasol 2* en Granada, España. Algunas características de este modelo (adaptadas a este caso de estudio) pueden consultarse en la tabla 2.

A continuación se describen las principales características del escenario de simulación desarrollado para este caso de estudio. Se ha considerado un periodo de tiempo suficientemente largo (desde 01/02/2013 hasta 31/05/2013) con el propósito

Tabla 1: Descripción de las estrategias de planificación analizadas

Estrat.	Modelo	Replanif.	Predic. a corto plazo	Realim. del estado de la planta
MPC DAS	MIP-MPC MIP-DAS	Horaria No	Horaria No	Horaria Diaria

Tabla 2: Características de la planta CSP

Capacidad bruta de turbina	52.5 MW-e
Capacidad de SF	250 MW-t
Capacidad térmica en modo sólo solar	140 MW-t
Capacidad térmica en modo sólo TES	119 MW-t
Múltiple solar	1.8
Capacidad de TES (modo sólo TES)	8 hours
Eficiencia de turbina (plena carga)	38%
Sin generación eléctrica con calderas	

de testear una gran variedad de condiciones meteorológicas. Se asume la participación en el mercado diario de electricidad, la imposibilidad del productor de influir en los precios (dado su pequeño volumen de producción) y predicción perfecta para los precios de la energía (obtenidos de la web del operador del mercado ibérico OMIE [1]). No se considera ninguna prima para la producción renovable. Los costes de penalización por MWh desviado respecto al plan comprometido son obtenidos del operador el sistema (Red Eléctrica de España). Por otra parte, los costes de generación se han supuesto despreciables por simplicidad. Las resoluciones del plan de producción y del modelo MIP-MPC son horarias. La frecuencia de replanificación es también horaria. Por tanto, $\Delta t_o = \Delta t_w = 1.0$ h (ver Fig. 1). El parámetro $t_{schedule_del}$ se considera igual a 10.0 h (mercado español en 2013). El parámetro Δw se fija a 48h. En consecuencia, la duración del intervalo INP a las 10.0h es 34 h, es decir, un esquema intermedio entre las planificaciones a un día vista y a dos días vista [14]. Para generar las predicciones $P_{SFmax}(j/i)$ (ver Fig.2), se usa el modelo detallado en [13]. El DNI y la temperatura ambiente son las únicas variables meteorológicas consideradas y la predicción de temperatura ambiente se supone perfecta y se crea mediante datos TMY2 [3]. La planta CSP se representa mediante un modelo de resolución horaria para evitar un alto tiempo de simulación, al igual que en [7, 8]. Particularmente, se emplea un modelo MIP derivado del propio modelo MIP-MPC. Por lo tanto, las diferencias de producción sólo se deben a errores de predicción del DNI. Este modelo se denomina en este trabajo modelo MIP-plant. Se dispone de un conjunto de predicciones a un día vista de radiación solar obtenidas por el modelo *Integrated Forecast System* (IFS) del Centro Europeo de Predicciones Meteorológicas a

Mediano Plazo (ECMWF). Además, también está disponible un conjunto de medidas de radiación solar. Ambos conjuntos se convierten a potencia térmica máxima disponible en SF mediante simulación con el modelo detallado de la planta CSP. En este estudio también se tienen en cuenta las predicciones a corto plazo de DNI. Se pueden consultar varios métodos en [9]. En ausencia de datos de predicción a corto plazo, se ha desarrollado un predictor sintético, que trabaja directamente con la variable $P_{SFmax}(j/i)$ para evitar la conversión de valores DNI. La ecuación (2) describe el predictor sintético a corto plazo utilizado.

$$P_{SFmax_STF}(k/i) = P_{SFmax_actual}(k/i) + r(k)(P_{SFmax_DA}(k/i) - P_{SFmax_actual}(k/i)) \quad (2)$$

para $k=1$ to $N_{STF}+1$; donde N_{STF} es el horizonte (horas) de la predicción a corto plazo; $r(k)$ es una función lineal con el índice k , $r(1) = 0$; $r(N_{STF} + 1) = 1$; $P_{SFmax_STF}(k/i)$, $P_{SFmax_actual}(k/i)$ y $P_{SFmax_DA}(k/i)$ son las máximas potencias térmicas disponibles en SF predichas a corto plazo, real y predichas a un día vista, respectivamente. Obsérvese que el porcentaje de error en la predicción a un día vista añadido al valor real para generar la predicción a corto plazo de la primera hora es 0. Este porcentaje crece linealmente con el tiempo hasta llegar a 100% cuando $k = N_{STF} + 1$, es decir, fuera del horizonte de predicción a corto plazo. Valores típicos para N_{STF} son 5 o 6 horas [9, 8].

Los modelos MIP se describen en la Subsección 3.1. La Subsección 3.2 presenta las propiedades de los siguientes datos de entrada: recurso solar, su predicción a un día vista y coste de penalización por kWh de desviación. Finalmente, los resultados y las conclusiones se exponen en la Subsección 3.3.

3.1 MODELOS MIP

En esta subsección se describen los tres modelos MIP, todos de resolución horaria. Los modelos MIP-DAS y MIP-plant se derivan del modelo MIP-MPC. La formulación de los tres modelos MIP para este caso de estudio no conllevó el empleo de elementos no lineales, excepto las variables binarias. Por lo tanto, son modelos MILP.

Es importante hacer una aclaración en este momento: se supone que el operador y los sistemas de control de la planta toman decisiones basadas en dos objetivos con diferente prioridad [13]. El objetivo de alta prioridad es minimizar el error de producción. Una vez que se cumpla este objetivo, la prioridad es minimizar la potencia térmica desenfocada en SF. Por lo tanto, la planta en estudio

tiene una única variable de decisión independiente en relación con el reparto de potencia, por ejemplo, la consigna para la generación de electricidad. Por tanto, la acción del MPC $u(1/i) = P_{e_SP}(1/i)$. Se usa la ecuación $P_{e_SP}(1/i) = P_e(1/i)$ para obtener la consigna, donde $P_e(1/i)$ es un valor generado por el control MPC.

3.1.1 Modelo MIP-MPC.

El conjunto de ecuaciones y desigualdades que compone el modelo MIP-MPC, junto con los valores de los parámetros presentes, se puede consultar en [13]. La función objetivo a minimizar se muestra en la expresión (3), que es un caso específico de la función objetivo en la Sección 2.

Minimize

$$J(i) = -\Delta t_o \sum_{j=1}^{N_{TI}} [p(j/i)P_{enet}(j/i) - \phi(j/i)(P_{erefnet}(j/i) - P_{enet}(j/i))] - \Delta t_o \sum_{j=N_{TI}+1}^N (p(j/i)P_{enet}(j/i) - KE(N+1/i)) \quad (3)$$

En esta función objetivo, no se tienen en cuenta los costes de generación y $KE(N+1/i)$ es el elemento de valor terminal, formado por un valor proporcional al nivel final de energía en TES, con la constante K definida por la ecuación $K = \eta p_{vlow}$, donde η es un factor de eficiencia para convertir energía almacenada en energía eléctrica neta y P_{vlow} es un valor muy inferior al precio mínimo de la electricidad durante el periodo simulado. De esta manera, el elemento de valor terminal hace que la energía térmica desenfocada sea tan baja como sea posible una vez se han maximizado los beneficios económicos (sin tener en cuenta el elemento de valor terminal). En el mercado español, la desviación sobre la producción comprometida, en caso de que requiere la intervención del operador del sistema, genera costes de penalización. Estas sanciones están asociadas con los costos incurridos para estabilizar el sistema, y no siguen ninguna función preestablecida. Por lo tanto, estos costes son difíciles de estimar. Un valor promedio de $\phi(j/i)$ se supone en la subsección 3.2.

3.1.2 Modelo MIP-DAS.

El modelo MIP-DAS es un modelo de optimización que genera el plan de producción para el día D+1 cuando $t(i) = t_{schedule_del}$ durante el día D cuando la estrategia DAS se está ejecutando. El modelo MIP-DAS se deriva del modelo MIP-MPC de la siguiente manera: el intervalo IS se elimina y el intervalo INP comienza la hora 0 del día D+1. Los valores iniciales para el instante previo a la hora 0 del día D+1 se estiman en $t_{schedule_del}$ del

día D utilizando el estado actual de la planta, la predicción a un día vista y el plan comprometido aún por cumplir.

3.1.3 Modelo MIP-plant.

Para evitar un tiempo de computación elevado, la representación de la planta CSP se realiza mediante un modelo MIP de resolución horaria. Se compone de dos modelos consecutivos de optimización derivados del modelo MIP-MPC. Los dos objetivos con diferente prioridad que guían las decisiones del operador de la planta y los sistemas de control (ver el comienzo de la sección 3.1) explican este esquema. Este modelo recibe cada hora la consigna generada a partir de las estrategias MPC o DAS. A continuación, se obtiene la evolución de la generación eléctrica y el estado de la planta en base a esta actualización horaria del punto de consigna, el valor real del recurso solar y los objetivos mencionados anteriormente.

3.2 DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA

En esta subsección se describen las características del recurso solar, su predicción a un día vista y los costos de penalización por MWh de desviación para el período de tiempo estudiado. La Fig. 3 muestra los valores promedio horarios de la potencia térmica máxima disponible en SF, $P_{SFmax_actual}(j)$, que se han obtenido usando datos de radiación solar y el modelo detallado de la planta CSP. Como puede observarse en la figura, a medida que avanzan los días, el perfil de $P_{SFmax_actual}(j)$ aumenta en intensidad y longitud. Además, aproximadamente los primeros setenta días presentan una alta variabilidad meteorológica, mientras que la estabilidad aumenta durante los últimos cincuenta días.

Una variable que puede influir en el desempeño de las estrategias de planificación es, evidentemente, el error de predicción de la máxima potencia térmica disponible en SF. En general, el error de predicción aumenta con la variabilidad meteorológica, es decir, los días de invierno presentan errores de predicción más altos que los días claros de verano. Con el fin de caracterizar el error de predicción a un día vista, la tabla 3 muestra algunas métricas a escala mensual, donde se han excluido las horas nocturnas. La media de la máxima potencia térmica disponible en SF se denomina \bar{P}_{SFmax_actual} . El error absoluto medio relativo y el error de sesgo medio relativo se denotan por $rMAE$ y $rMBE$ respectivamente, (vea [7] para las expresiones de estas métricas). Algunas comentarios pueden realizarse. La media de la máxima potencia térmica disponible en SF

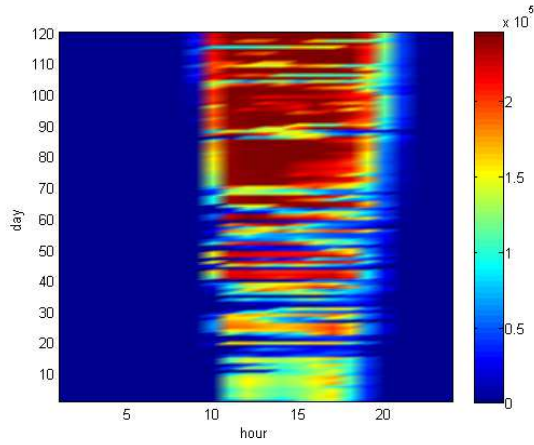


Figura 3: Valores medios horarios de la máxima potencia térmica disponible en SF (kW)

Tabla 3: Métricas de la predicción a un día vista para la máxima potencia térmica disponible en SF

Mes	P_{SFmax_actual} (MW)	$rMAE$ (%)	$rMBE$ (%)
Feb.	82.5	32.1	3.8
Mar.	87.6	52.8	8.4
Abr.	152.4	25.7	-5.3
May.	164.4	17.8	10.6

aumenta cerca del 100% de Febrero a Mayo. El error relativo es mayor en los meses de invierno. De hecho, Marzo ha sido particularmente malo en el período estudiado. Finalmente, el error de sesgo puede variar ampliamente.

La estrategia MPC propuesta emplea un valor $\phi(j, i)$ constante. Concretamente, $\phi(j, i) = \bar{\phi}$, donde $\bar{\phi} = 7.69$ Euros/MWh es el valor medio de los costes de penalización durante el primer período de seis meses de 2013.

3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta subsección se muestran y comentan los resultados de la simulación. Es importante remarcar que hay muchos factores que afectan los resultados económicos de las estrategias de planificación, por ejemplo, las normas regulatorias del mercado de la electricidad, el clima local de la planta, las predicciones, el diseño de la planta, las hipótesis de simplificación aplicadas y los modelos utilizados [8]. Por tanto, las conclusiones extraídas de este caso de estudio podrían ser diferentes en otros escenarios. A continuación, se realizan los siguiente análisis: (1) comparación económica entre las estrategias MPC y DAS; (2) cálculo mensual del porcentaje de mejora en los beneficios de la estrategia MPC respecto a la estrategia de DAS; y (3) análisis energético de ambas estrategias.

La tabla 4 muestra los resultados económicos totales de las estrategias DAS y MPC, donde puede

Tabla 4: Resultados económicos de las estrategias DAS y MPC

	DAS	MPC
Ingresos (Euros)	2148321	2228481
Penalizaciones (Euros)	38969	58949
Beneficios (Euros)	2109352	2169532

Tabla 5: Porcentaje de mejora en los beneficios de la estrategia MPC respecto a la estrategia DAS

Febrero	Marzo	Abril	Mayo
4.4%	7.3%	3.4%	0.9%

apreciarse la mejora de la estrategia MPC en relación a los beneficios finales.

La tabla 5 muestra, para cada mes, el porcentaje de mejora en los beneficios de la estrategia MPC con respecto a la estrategia DAS. Como puede observarse, la estrategia MPC obtiene mejoras sustanciales cuando la inestabilidad meteorológica está presente. De hecho, el mejor resultado se obtiene en marzo, es decir, el mes con peor predicción para la máxima potencia térmica disponible en SF. En este sentido, la estrategia MPC puede compensar situaciones de baja calidad en la predicción.

La tabla 6 muestra algunos resultados energéticos de las estrategias DAS y MPC. Se observa que la generación es ligeramente inferior cuando se ejecuta la estrategia MPC. Además, los valores asociados con la estrategia MPC para la desviación y la energía desenfoada son también peores. La mejora económica de la estrategia MPC queda reflejada en el parámetro *Precio de venta equivalente*. Este parámetro se define como la relación entre los beneficios totales y la generación total. Los peores resultados energéticos de la estrategia MPC se explican por su capacidad para admitir desviaciones con objeto de poder reservar energía para posibles mayores ingresos futuros, como su mayor nivel medio de energía en TES confirma. Esta capacidad se basa en el deslizamiento horario de la ventana MPC, que va incorporando nueva información (precisa o no). En cualquier caso, aunque la desviación total puede ser mayor con la estrategia MPC, esta estrategia la distribuye aprovechando las horas más favorables obteniendo una mejora de 2,33 % en el precio de venta equivalente. La Fig. 4 muestra la distribución de la generación eléctrica en relación con intervalos de precios para ambas estrategias. Se puede observar el desplazamiento de la generación de la estrategia MPC hacia precios altos en comparación con la estrategia DAS.

Las siguientes conclusiones pueden extraerse de-

Tabla 6: Resultados energéticos de las estrategias DAS y MPC

Valor medio horario	DAS	MPC	%
Generación (MWh-e)	12.42	12.37	-0.43%
Desviación (MWh-e)	1.46	1.76	20.68%
Energía desenf. (MWh-t)	4.26	4.39	3%
Nivel de energía en TES (%)	23.29	28.04	20.37 %
Prec. venta equiv. (Euros/MWh-e)	64	65.49	2.33%

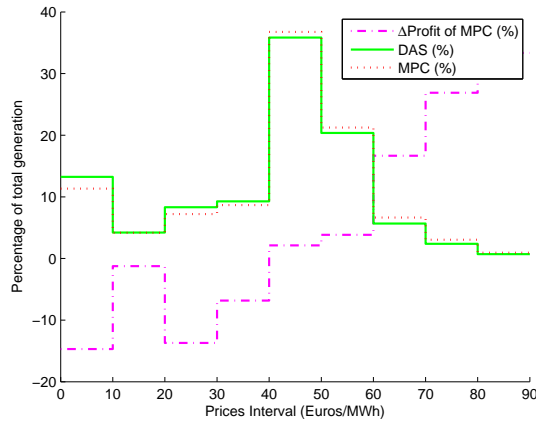


Figura 4: Distribución de la generación respecto a intervalos de precios para las estrategias DAS y MPC (%)

spués de analizar los resultados:

1. La estrategia MPC obtiene mayores beneficios totales que la estrategia DAS durante el período de cuatro meses.
2. La mejora en los beneficios de la estrategia MPC en relación con la estrategia DAS es mayor en períodos con baja calidad en la predicción del recurso solar. En este sentido, el porcentaje de mejora durante Marzo es superior al 7%.
3. La mejora de la estrategia MPC se basa en la replanificación horaria, que se adapta a la situación actual y desplaza la generación a horas de alto precio.

En opinión de los autores, la estrategia MPC propuesta podría alcanzar mejores resultados en las siguientes situaciones:

1. En el caso real de predicción imperfecta del precio de la energía, la estrategia MPC podría superar más claramente a la estrategia DAS gracias al conocimiento perfecto de los precios del día actual a partir de una hora determinada.
2. En escenarios con un mayor nivel de costes de penalización, el desempeño de la estrategia MPC puede tener más importancia.

3. Se pueden evaluar modelos más complejos para el término de penalización en la función de optimización.
4. Otros aspectos como analizar el efecto de la longitud de la ventana deslizante, o incluir términos robustos en el problema de optimización, son interesantes para investigar.

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha propuesto una estrategia MPC para abordar la planificación óptima de producción en plantas CSP con TES. Uno de los principales obstáculos presente en esta clase de problemas es el coste de penalización que aplica el mercado cuando se produce una desviación respecto al plan de producción comprometido. La existencia de este desvío se debe principalmente a la predicción limitada del recurso solar. El enfoque propuesto aborda este problema mediante dos actuaciones: (1) la replanificación periódica de la producción en busca de una solución más ventajosa económicamente haciendo uso de información actualizada de la predicción solar y el estado de la planta, y (2) el desarrollo, en el instante previsto para ello, de un plan de producción para el día siguiente más fácil de ejecutar gracias al uso de una mejor estimación para las condiciones iniciales del día siguiente. Para realizar las actuaciones anteriores, la función objetiva del MPC se construye con términos económicos en los que se emplean precios predichos de la electricidad y estimaciones de los costes de penalización. La estrategia propuesta se ha aplicado, en un contexto de simulación, a una planta CSP de 50 MW basada en colectores cilindro-parabólicos con almacenamiento térmico bajo las hipótesis de participación en el mercado diario español de la electricidad y una perfecta predicción de precios. Este caso de estudio se basa en un período de cuatro meses para probar varias condiciones meteorológicas. El enfoque propuesto se ha comparado con una estrategia de referencia basada en una planificación a día vista. El análisis comparativo abarca resultados económicos y energéticos. Se observa una mejora económica significativa, especialmente en períodos con malas predicciones de recurso solar. Finalmente, se han indicado varias líneas de investigación futuras: 1) análisis de escenarios con predicciones imperfectas de los precios de la electricidad o niveles más altos de penalización, 2) desarrollo de métodos más complejos para estimar el costo de la penalización, y 3) provisión de robustez para el enfoque propuesto.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto

DPI2016-76493-C3-2-R del Ministerio de Economía y Competitividad (España).

Referencias

- [1] OMIE. Last access: 28.04.17. <http://www.omie.es/>, 2017.
- [2] The SAM website. Last access: 28.04.17. <https://sam.nrel.gov/>, 2017.
- [3] User's manual for TMY2s. Last access: 28.04.17. <http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/tmy2/>, 2017.
- [4] José Manuel Bravo, T. Alamo, and E. F. Camacho. Robust MPC of constrained discrete-time nonlinear systems based on approximated reachable sets. *Automatica*, 42(10):1745 – 1751, 2006.
- [5] Isabel Llorente Garcia, Jose Luis Alvarez, and Daniel Blanco. Performance model for parabolic trough solar thermal power plants with thermal storage: Comparison to operating plant data. *Solar Energy*, 85(10):2443 – 2460, 2011.
- [6] Christoph Kost, Christoph M. Flath, and Dominik Most. Concentrating solar power plant investment and operation decisions under different price and support mechanisms. *Energy Policy*, 61(0):238 – 248, 2013.
- [7] Birk Kraas, Marion Schroedter-Homscheidt, and Reinhard Madlener. Economic merits of a state-of-the-art concentrating solar power forecasting system for participation in the Spanish electricity market. *Solar Energy*, 93(0):244 – 255, 2013.
- [8] Edward W. Law, Merlinde Kay, and Robert A. Taylor. Calculating the financial value of a concentrated solar thermal plant operated using direct normal irradiance forecasts. *Solar Energy*, 125:267 – 281, 2016.
- [9] Edward W. Law, Abhnil A. Prasad, Merlinde Kay, and Robert A. Taylor. Direct normal irradiance forecasting and its application to concentrated solar thermal output forecasting — A review. *Solar Energy*, 108(0):287 – 307, 2014.
- [10] David Q. Mayne. Model predictive control: Recent developments and future promise. *Automatica*, 50(12):2967 – 2986, 2014.
- [11] R. Sioshansi and P. Denholm. The value of concentrating solar power and thermal energy storage. *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, 1(3):173–183, Oct 2010.
- [12] J. Usaola. Operation of concentrating solar power plants with storage in spot electricity markets. *Renewable Power Generation, IET*, 6(1):59–66, January 2012.
- [13] Manuel Jesús Vasallo and José Manuel Bravo. A MPC approach for optimal generation scheduling in CSP plants. *Applied Energy*, 165:357 – 370, 2016.
- [14] Michael Wittmann, Markus Eck, Robert Pitz-Paal, and Hans Muller-Steinhagen. Methodology for optimized operation strategies of solar thermal power plants with integrated heat storage. *Solar Energy*, 85(4):653 – 659, 2011. SolarPACES 2009.

Evaluación multicriterio para la optimización de redes de energía

Ascensión Zafra, Rafael Espinosa, Miguel Ángel Ridao, Carlos Bordóns

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática.

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

{asunzafra,bordons,miguelridao}@us.es, rafaelespinosa2005@hotmail.com

Resumen

Este trabajo propone una herramienta para ayudar en la toma de decisión de la planificación de redes de energía. Se incluye una evaluación multicriterio de los escenarios posibles de planificación considerando distintos criterios y ponderaciones. Para este cometido se usa la herramienta multiobjetivo discreta PROMETHEE y planos GAIA. El conjunto de escenarios se genera considerando incertidumbres que puede presentar el sistema. La simulación de la red eléctrica se lleva a cabo en la herramienta comercial OpenDSS. Para ilustrar la herramienta se ha tomado una red de la IEEE, donde se observan los beneficios del método propuesto. Los resultados obtenidos muestran que el tomar incertidumbres en el proceso de optimización de las redes de potencia, supone un gran aumento en la eficiencia de la red.

Palabras clave: Gestión Microrredes, Optimización Multicriterio, Incertidumbres, Simulación

1 INTRODUCCIÓN

Estamos en una era donde se está realizando una transición del sistema eléctrico tradicional a redes de menor tamaño con incorporación de sistemas de almacenamiento. Las previsiones de energía indican un crecimiento moderado de la demanda, un fuerte incremento de las energías renovables y una necesidad de potencia firme y flexible. Todo ello está haciendo que el concepto de red eléctrica “inteligente” y microrredes estén tomando un considerable auge, propiciando el desarrollo de técnicas de gestión que mejoren el rendimiento y desempeño de la red [5].

Las redes eléctricas inteligentes (o *smart grids* en inglés) integran las tecnologías de la información con las infraestructuras eléctricas actuales, haciendo posible una comunicación bidireccional entre generadores, y consumidores. El nuevo modelo energético pretende transformar el sistema actual en un sistema distribuido, en el cual, cualquier agente que esté conectado a la red tiene la posibi-

lidad de aportar energía, apoyando la creación de microgeneradores. De esta forma, no existe una dependencia tan directa como con la generación energética actual. Las redes inteligentes disminuyen drásticamente las pérdidas por el transporte energético, facilitan la conexión a la red de todo tipo de energías renovables (mejorando la integración de porcentajes crecientes de energías no gestionables como la eólica o la solar), soportan las capacidades de almacenamiento energético y la conexión masiva de vehículos eléctricos o híbridos (tanto para cargar como para volcar energía a la red)[12].

Dentro de las redes eléctricas inteligentes, se pueden distinguir las microrredes, inicialmente introducidas en [11]. Se trata de una alternativa para abordar la integración de recursos energéticos distribuidos, como las energías renovables o los coches eléctricos. Según [7], las microrredes pueden considerarse como un conjunto de cargas, generadores y sistemas de almacenamiento coordinadas tal que puedan suministrar electricidad de forma factible. Pueden funcionar de forma aislada o conectadas a la red principal, vistas desde esta última como un elemento único que responde a las señales de control. Es por tanto necesario controlar la microrred para que desempeñe su función de forma estable y económica.

Usualmente, en el control de las microrredes se plantean problemas de optimización en los cuales se valoran distintos objetivos [8, 6]. Así por ejemplo, en la planificación diaria de una microrred se ha de valorar la satisfacción de las demandas, el coste económico, la fiabilidad de los componentes,... llegando a una solución de compromiso entre el conjunto de factores. La mejor estrategia a seguir dependerá en parte de los objetivos considerados, sus prioridades y ponderaciones.

Se pueden encontrar en la literatura, distintas técnicas de decisión multicriterio (o multiobjetivo) aplicadas a sistemas ([1], [10]). Una posible clasificación de estos métodos se puede hacer atendiendo si la región factible del problema es continua o discreta. Dentro de esta última se destaca la técnica PROMETHEE (Preference Ranking Organisational Method for Enrichment Evaluation)

[4].

Este trabajo presenta una herramienta de decisión multiobjetivo para la optimización de la planificación de microrredes. La generación de las distintas alternativas de configuración de la microrred se realiza considerando incertidumbres. En este trabajo la fuente de incertidumbres viene determinada por la incorporación de fuentes de energía renovables y coches eléctricos en la microrred. De esta forma, el conjunto de alternativas y por tanto las posibilidades del decisor se ve incrementada. La simulación de cada alternativa se lleva a cabo en el paquete software OpenDSS, donde se valoran las pérdidas de la red en cada uno de los nodos y la satisfacción de la demanda. Los resultados de la simulación son usadas en la evaluación multicriterio usando la técnica PROMETHEE y planos GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Assistance), obteniendo la mejor de las opciones de la configuración de la microrred ([3]).

La organización del artículo es la siguiente. La sección 2 expone cómo se lleva a cabo la generación de alternativas de configuración de una red de energía. La sección 3 describe cómo se evalúan cada una de estas alternativas, considerando indicadores como pérdidas, satisfacción de la demanda, etc... En este apartado se describe la herramienta de simulación OPenDSS. La evaluación multicriterio se describe en la sección 4, con la técnica PROMETHEE y planos GAIA. En la sección 5 se usa la microrred de la IEEE de 37 nodos a la cual se le han realizado algunos cambios para incluir coches eléctricos y otras fuentes renovables, poniendo de manifiesto cada uno de los pasos seguidos. Finalmente, el capítulo 6 concluye este artículo, mostrando las conclusiones.

2 GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE CONFIGURACIÓN DE MICRORRED

Este punto tiene como objetivo generar un conjunto de escenarios posibles de configuración de la microrred con objeto de elegir la más idónea atendiendo a una evaluación multicriterio.

Para ello, se van a introducir variabilidad en las siguientes variables:

- Costes de producir cada unidad de potencia de las fuentes, C_i (euros)
- Cargas puntuales en cada uno de los nodos de la red, considerando dentro de ellas las conexiones de los coches eléctricos, L_i (kWh)

- Potencia suministrada por cada uno de los generadores de la microrred, P_i (kWh)

Partiendo de una configuración inicial, al que llamaremos escenario nominal, se generarán las distintas realizaciones de estas variables atendiendo a variables estocásticas. En nuestro caso, se modelan con funciones de distribución de probabilidad identificando datos históricos. Las funciones de distribución se discretizarán en un conjunto finito de escenarios posibles [2].

Un proceso estocástico, \mathbf{P} , se define de forma generalizada como una colección de na variables aleatorias dependientes:

$$\mathbf{P} = \{y_t^i, t \in T, i \in \{1 \dots na\}\},$$

donde para cada t en el espacio temporal T , y_t^i es el estado de la variable aleatoria i en el tiempo t . Se trata ahora de determinar la estructura probabilística de las variables $\{y_t^i\}$, estudiando su comportamiento probabilístico y la interrelación entre ellas (dependencia estática). Este procedimiento puede ser bastante complejo; en nuestro caso se asume que el proceso estocástico sigue una distribución Gaussiana en la que se ha de especificar el vector de valores medios y la matriz de covarianza. En [13] se puede ver cómo modelar un proceso estocástico si no se asume lo anterior y se recurre a series temporales basadas en modelos ARMA (AutoRegressive Moving Average).

3 SIMULACIÓN DE ALTERNATIVAS

Considérese el conjunto de n alternativas $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ y m criterios de evaluación. En este apartado se trata de evaluar cada alternativa respecto a cada criterio, $f^c(A_i)$, con $c = 1 \dots m$ y $i = 1 \dots n$. En nuestro caso, las distintas alternativas son parámetros de configuración de la red de energía. Para obtener los resultados se necesita el modelo de la red. En este trabajo se va a usar para la simulación el software OpenDSS (Open-source Distribution System Simulator) [9].

OpenDSS es un software de simulación de sistemas de distribución de energía eléctrica, desarrollado por EPRI (Electric Power Research Institute). Es un programa de simulación en el dominio de la frecuencia con las funcionalidades propias de los simuladores comerciales, así como nuevas herramientas que tienen en cuenta futuras necesidades relacionadas con los esfuerzos de modernización de las redes actuales. El programa fue originalmente pensado como una herramienta para el análisis de la interconexión de generación distribuida, pero su continua evolución ha llevado al

desarrollo de otras funcionalidades que son adecuadas, por ejemplo, para estudios de eficiencia en el suministro de energía y estudios de armónicos. OpenDSS representa los circuitos de distribución a través de ecuaciones de admitancias nodales. Cada elemento del sistema es representado por una matriz de admitancia nodal primitiva. Cada matriz primitiva es adjuntada a la matriz de admitancias del sistema, por lo que el sistema de ecuaciones que representa al sistema es solucionado con la ayuda de algoritmos de matrices dispersas. OpenDSS está diseñado para recibir instrucciones y devolver resultados en formato de texto. Puede accederse al programa tanto a través de una aplicación independiente como del módulo COM server. La aplicación independiente cuenta con una interfaz de usuario básica, aunque completamente funcional, que permite interactuar con el programa, mientras que el COM server permite conectar el OpenDSS con otros programas tales como Matlab, proporcionando de esa manera una gran capacidad de análisis de la información. La figura 1 muestra cómo interactúan los diferentes módulos dentro de la estructura de OpenDSS.

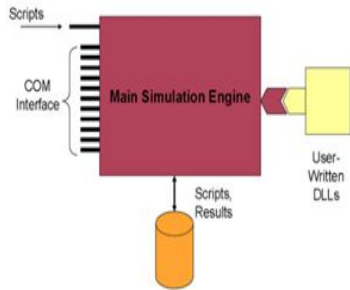


Figura 1: Esquema OpenDSS

En este trabajo las distintas alternativas se ejecutan desde un módulo de programación en Matlab.

4 EVALUACIÓN MULTICRITERIO

Para la evaluación de las distintas alternativas de configuración de la red, se ha optado por el método discreto PROMETHEE [4]. Esta técnica parte de la base de que el decisor debe establecer la importancia relativa de cada uno de los criterios para luego definir una estructura de preferencia entre las alternativas. De esta forma, se definen funciones de preferencia que evitan la ambigüedad en la determinación de los umbrales de cada criterio. Para cada criterio se asocia una función con la que se valora la preferencia de una alternativa respecto a otra. De esta forma $P_c(A_i, A_k)$ representa la decisión entre la alternativa A_i y A_k con respecto al criterio c . El valor obtenido está en el rango entre

0 y 1.

Para aplicar el método PROMETHEE se necesita de forma adicional los pesos de cada criterio, w_j . Se computa para cada par de alternativas A_i y A_k la decisión con respecto a todos los criterios, expresada de la forma:

$$\pi(A_i, A_k) = \frac{\sum_{j=1}^m P_j(A_i, A_k)}{\sum_{j=1}^m w_j} \quad (1)$$

Con el fin de posicionar cada alternativa con respecto a las demás, PROMETHEE computa los flujos de preferencia positivo y negativo, ϕ^+ y ϕ^- para cada alternativa.

$$\begin{aligned} \phi^+(A_i) &= \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n \pi(A_i, A_k) \\ \phi^-(A_i) &= \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n \pi(A_k, A_i) \end{aligned} \quad (2)$$

El flujo positivo $\phi^+(A_i)$ cuantifica cómo la alternativa A_i es dominante sobre las otras. El flujo negativo $\phi^-(A_i)$ representa cuánto es dominado por las otras alternativas. La diferencia de ambos, el flujo neto ϕ , se obtiene para ordenar las alternativas:

$$\phi(A_i) = \phi^+(A_i) - \phi^-(A_i) \quad (3)$$

Un valor mayor en una alternativa que en otra de esta variable, representa una mejor valoración.

5 EJEMPLO: RED IEEE DE 37 NODOS AMPLIADA

La red de distribución que se usará para ilustrar el método corresponde al Test Case IEEE 37-bus Feeder, compuesta de 37 nodos. En esta red se puede diferenciar un regulador entre el bus 799 y el nodo 701 y un transformador entre los nodos 709 y 775. Como ya se ha descrito con anterioridad, se utilizará una modificación de esta red de distribución. La principal diferencia es la incorporación de diferentes agentes a esta red, tales como una batería (o grupo electrógeno), una pila de combustible, un generador solar, un generador eólico y un coche eléctrico. Los nodos donde colocaremos estos agentes serán los nodos 701, 720, 730, 722 y 737 respectivamente. La figura 2 muestra la configuración de esta red. Las propiedades de cada uno de los nodos se describen en un fichero de texto que toma como entrada de datos el simulador.

5.1 PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

El objetivo principal de nuestro problema será el de satisfacer la demanda de energía de nuestra red

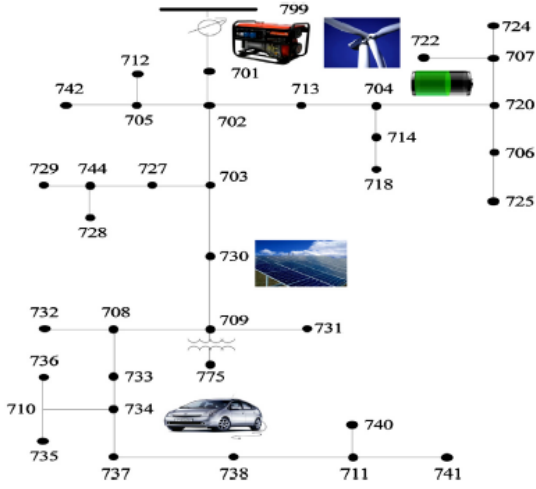


Figura 2: Red de energía de ejemplo.

y de los coches eléctricos (mediante el empleo de los diferentes generadores ya implementados en OpenDSS), reducir los costes de operación y reducir en todo lo posible las pérdidas que se puedan producir en la red. Esto queda reflejado en la siguiente función objetivo:

$$\begin{aligned}
 F = & \beta_1 \sum_{t=1}^{24} (D(t) - E(t))^2 + \\
 & + \beta_2 \sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^4 (C_j(t) * P_j(t) + \\
 & + \beta_3 \sum_{t=1}^{24} P_{er}(t)
 \end{aligned} \quad (4)$$

donde $D(t)$ es la suma de la demanda de energía de los n_i coches eléctricos y de la red; $E(t)$ es la suma de las energías producidas por los generadores, C_j es el coste de producir una unidad de energía en el generador j y P_j es la potencia generada por el generador j . El término $P_{er}(t)$ representa las pérdidas de potencia de la red por hora. Nótese que todos los sumatorios están realizados en un intervalo de 24 horas. El sumatorio $j = 1 \dots 4$, corresponde a los 4 generadores existentes en la red.

Los diferentes pesos de la función objetivo se han asignado como $\beta_1 = 0.4$, $\beta_2 = 0.4$ y $\beta_3 = 0.2$. Los valores de carga en cada uno de los nodos se establecen en el fichero de texto de entrada al simulador. Una vez calculadas las pérdidas de la red así como la comprobación del abastecimiento de los nodos, se pueden extraer los valores desde el entorno Matlab con los siguientes comandos:

`DSSText.command='show generators';`

`DSSText.command='show meters';`

`DSSText.command='show losses';`

El coste de producir el kWh para cada uno de los generadores, se han tomado de la web de IRENA (Agencia Internacional de Energías Renovables). Para las energías solares y eólicas, el rango de coste está entre 0.05 y 0.08 €/kWh. Para los combustibles fósiles y otras energías entre 0.045 y 0.14 €/kWh. La tabla 1 muestra los valores nominales de coste por kWh y potencia nominal de los 4 generadores.

Tabla 1: Valores nominales de costes y potencias de los generadores.

Generador	Coste (€)	Potencia
G. Electrónico	$C_1 = 0.045$	$P_1 = 1kW$
P. de Combustible	$C_2 = 0.05$	$P_2 = 8kW$
Energía eólica	$C_3 = 0.05$	$P_3 = 2300kW$
Energía solar	$C_4 = 0.08$	$P_4 = 78kW$

La decisión a tomar en este problema viene determinada por las potencias de entrada de los generadores.

Para la generación del conjunto de alternativas, según se establece en la sección 2, se han considerado como variables estocásticas los siguientes valores:

- Los costes de producir cada unidad de potencia, $\{C_1, C_2, C_3, C_4\}$.
- Valor de las cargas de los coches eléctricos dependiendo del instante de tiempo, L_i .
- Potencia suministrada por los generadores ($\{P_1, P_2, P_3, P_4\}$).

5.2 RESULTADOS

Cada una de las alternativas propuestas se ha evaluado atendiendo a los 3 criterios establecidos en la expresión 5.1 y obteniendo los resultados del software de simulación OpenDSS. El siguiente paso es introducir cada una de las alternativas y su valoración con respecto a cada criterio en el programa Visual Promethee-GAIA.

Los experimentos realizados se han clasificado dependiendo de la generación de alternativas. Se verá a continuación que los primeros escenarios se generan cambiando sólo un criterio en cada alternativa. En el segundo bloque, las alternativas se generan modificando varios criterios en cada alternativa.

5.2.1 Alternativas con incertidumbres en un sólo criterio

En este primer grupo de resultados, las alternativas se han generado introduciendo incertidumbres en un sólo criterio. Para el resto de criterios, permanecen los valores nominales. De esta forma se han llevado a cabo 3 grupos de evaluaciones. En la primera evaluación, las alternativas sólo han visto modificada la potencia de los generadores; en la segunda, las cargas de los nodos y en la tercera, los costes de producción de la energía. A título de ejemplo, la figura 3 muestra los resultados de PROMETHEE cuando se evalúan 7 alternativas correspondientes a variar los costes de producción de energía. El resultado que devuelve establece que la mejor alternativa es la A_{19} , consistente en aumentar el coste del kW del grupo electrógeno en un 20%. Las 3 columnas últimas muestran el flujo neto, flujo positivo y flujo negativo. Nótese que las alternativas se ordenan atendiendo al flujo neto.

Rank	action		Phi	Phi+	Phi-
1	Alternativa 19		0,4571	0,4571	0,0000
2	Alternativa 15		0,3429	0,4000	0,0571
3	Alternativa 16		0,2286	0,3429	0,1143
4	Alternativa 20		0,1143	0,2857	0,1714
5	Alternativa 22		-0,0571	0,1714	0,2286
6	Alternativa 17		-0,1143	0,1714	0,2857
7	Alternativa 18		-0,2286	0,1143	0,3429
8	Alternativa 21		-0,7429	0,0000	0,7429

Figura 3: Evaluación multicriterio de alternativas con cambios en coste del Kw.

En la siguiente simulación, se comparan las 3 alternativas mejores resultantes de variar potencias, cargas y costes de forma independiente, como se ha detallado anteriormente, siendo éstas:

- A_5 : Se mantienen cargas y costes y se reduce potencia nominal en un 10%.
- A_8 : Se mantienen potencias nominales y costes y se reducen cargas en un 5%.
- A_{19} : Se mantienen potencias nominales y cargas y se aumenta el coste del grupo electrógeno en un 20%.

De la figura 4 se puede deducir que si sólo se produjesen cambios en una de las tres direcciones o criterios que se han establecido, la mejor opción sería mantener los costes y las potencias nominales iniciales, intentando reducir las cargas (A_8 , cargas al 95%), es decir, que el consumo sea menor. Esto ajustaría al máximo la diferencia entre demanda y generación de potencia.

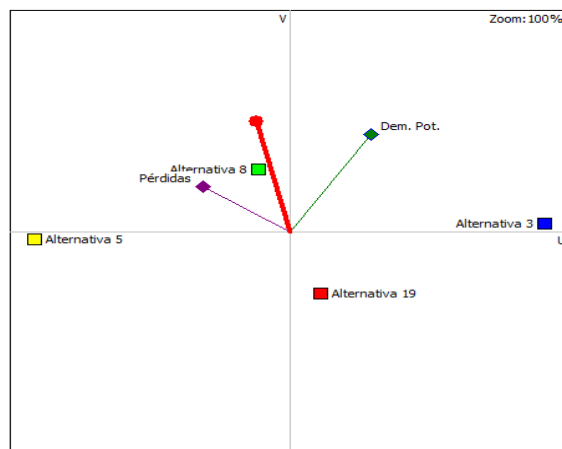


Figura 4: Plano GAIA.

Se puede observar en el plano GAIA dónde se encontraría la localización de la mejor alternativa. La A_8 es la más cercana a esta dirección de mejora. Sin embargo la alternativa A_{19} está justo en la dirección contraria a ella. Sería interesante ver, no sólo poder comparar situaciones con valores fijos, si no con rangos de valores. Para esto tenemos la curva de eficiencia o Frente de Pareto, donde observamos por donde nos podemos mover eficientemente al aumentar o disminuir el coste o la satisfacción de la demanda (ver figura 5).

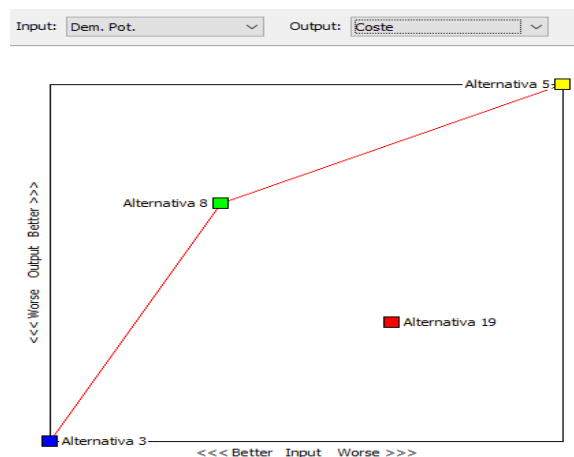


Figura 5: Frente Pareto Demanda- Coste.

La siguiente simulación pone de manifiesto como afecta la decisión cuando se cambian los pesos en la función objetivo. En este caso se han cambiado los pesos a $\beta_1 = 0.25$, $\beta_2 = 0.5$ y $\beta_3 = 0.25$. Como se puede observar en la figura 6 la mejor alternativa ahora cambia, siendo la alternativa A_5 .

5.2.2 Alternativas con incertidumbres en varios criterios

Todas las decisiones tomadas en el apartado anterior ponen de manifiesto cómo actuar si sólo se

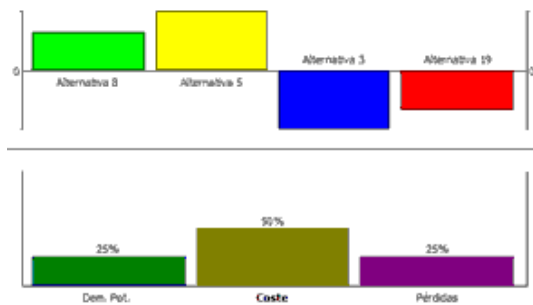


Figura 6: Evaluación de alternativas con cambio en los pesos de la función objetivo.

presentan cambios en una dirección. Este escenario es poco probable, por lo que el estudio de cambios en varios criterios parece la mejor forma de comparar los resultados.

La tabla 5.2.2 presenta las alternativas para las modificaciones combinadas, realizadas a partir de la situación inicial. Así por ejemplo, la alternativa A_3 considera un incremento en la demanda del 10% y una reducción en la producción de energía del 10%.

Tabla 2: Generación de alternativas modificando varios criterios.

Alternativa	Carga	Potencia	Coste
A_1	-	-	-
A_2	105	95	-
A_3	110	90	-
A_4	95	105	-
A_5	90	110	-
A_6	105	-	95
A_7	110	-	90
A_8	95	-	105
A_9	90	-	110
A_{10}	-	105	95
A_{11}	-	110	90
A_{12}	-	95	105
A_{13}	-	90	110
A_{14}	110	90	110
A_{15}	110	110	110
A_{16}	90	90	110
A_{17}	90	110	110
A_{18}	110	110	90
A_{19}	110	90	90
A_{20}	90	110	90
A_{21}	90	90	90

Los resultados obtenidos con PROMETHEE se muestran en la figura 7. Se pueden deducir los siguientes comentarios:

- La situación más favorable es reducir las potencias de los generadores si se detecta que

se satisface correctamente la demanda y se ha producido una reducción de costes (A_{21}). La alternativa A_{16} obtiene un resultado parecido, aumentando el coste en un 10%.

- Si se produjese una reducción de costes, se podría aumentar la potencia generada en un 5% (A_{10}) para obtener un buen resultado. Si esto no es posible, se podría permitir un aumento en las cargas de un 5% (A_6). Se empeoraría la satisfacción de la demanda pero se reducirían costes.
- Hay una gran cantidad de alternativas o situaciones que resultan con peor comportamiento a la inicial. Es el caso de todas aquellas que se encuentran por debajo de la alternativa A_1 , presentando un flujo negativo. Muchas de ellas (A_5 , A_{17} o A_{20}) se producen cuando se decide aumentar la producción de energía significativamente si se reducen las cargas, algo que claramente no se debe hacer.

Rank	action	Phi	Phi+	Phi-
1	Alternativa 21	0,8700	0,9100	0,0400
2	Alternativa 16	0,5500	0,7100	0,1600
3	Alternativa 10	0,2200	0,6000	0,3800
4	Alternativa 6	0,2000	0,5900	0,3900
5	Alternativa 8	0,1600	0,5700	0,4100
6	Alternativa 11	0,1200	0,5100	0,3900
7	Alternativa 13	0,1200	0,5100	0,3900
8	Alternativa 19	0,1000	0,5100	0,4100
9	Alternativa 2	0,0600	0,5200	0,4600
10	Alternativa 7	0,0200	0,5000	0,4800
11	Alternativa 12	0,0200	0,5000	0,4800
12	Alternativa 3	0,0200	0,4700	0,4500
13	Alternativa 1	-0,0400	0,4800	0,5200
14	Alternativa 4	-0,0400	0,4700	0,5100
15	Alternativa 9	-0,0600	0,4600	0,5200
16	Alternativa 18	-0,0700	0,4000	0,4700
17	Alternativa 14	-0,2200	0,3100	0,5300
18	Alternativa 20	-0,2400	0,3000	0,5400
19	Alternativa 15	-0,5100	0,2200	0,7300
20	Alternativa 5	-0,6000	0,1600	0,7600
21	Alternativa 17	-0,6800	0,1200	0,8000

Figura 7: Evaluación de alternativas con cambios en varios criterios.

Las figuras 8 y 9 representan el Frente Pareto para el criterio satisfacción de demanda frente a las pérdidas de la red y costes de producción, respectivamente. Se puede observar que las alternativas A_{21} y A_{10} se encuentran en la optimalidad para las dos comparaciones. Otras alternativas, dependiendo de la prioridad de la función objetivo, cambian su posición.

Para finalizar, se muestra el plano GAIA de todas las alternativas. Se observan las direcciones

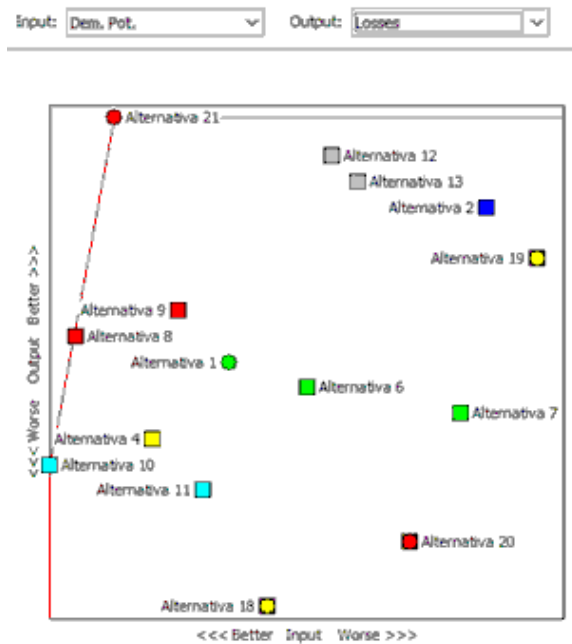


Figura 8: Frente Pareto Demanda-Pérdidas.

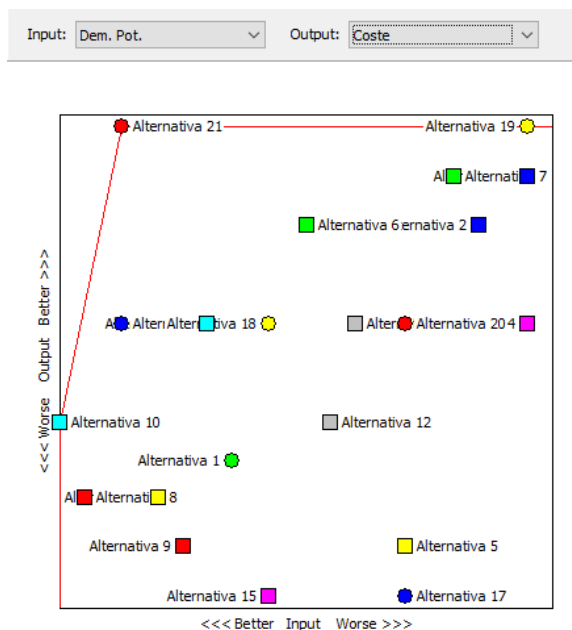


Figura 9: Frente Pareto Demanda-Costes.

de mejora de cada criterio y la combinación de los tres. Alternativas como la A_{20} , A_5 o A_{15} se encuentran en sentido opuesto a la óptima, mientras que las alternativas A_{21} , A_{12} o A_{16} están en dirección y sentido hacia la mejor situación. Otras como la A_8 se encuentran opuestas al coste, pero muy favorables a la satisfacción de la demanda. De igual forma ocurre para la A_6 en relación al coste-demanda.

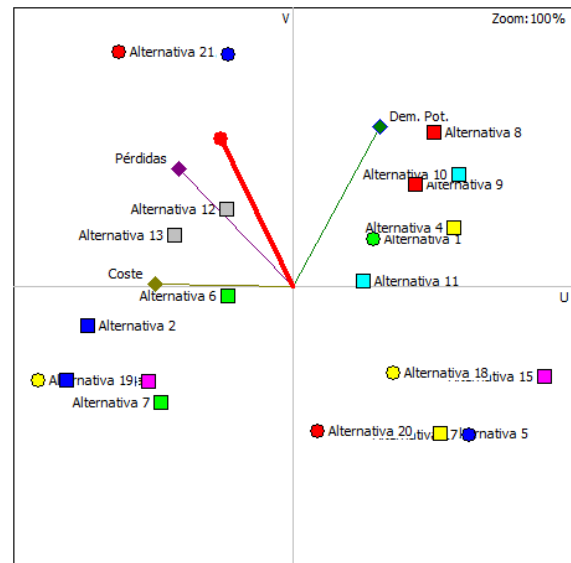


Figura 10: Plano GAIA.

6 CONCLUSIONES

La utilización del método de evaluación Promethee ha permitido optimizar varios criterios de forma simultánea presentados de una forma gráfica, ayudando a la toma de decisión. La incorporación de incertidumbres en las alternativas a valorar hace que la solución a determinar sea más eficiente.

La selección de OpenDSS como herramienta de simulación presenta ventajas evidentes; permite modelar cualquier tipo de red de energía con cargas constantes en los nodos o bien que varíen con el tiempo (diarias). Ello proporciona un valor agregado al contemplar condiciones más reales para el sistema.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto CONFIGURA (DPI2016-78338-R) perteneciente al programa de proyectos de investigación del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España.

Referencias

- [1] C. Araz and I. Ozkarahan. Supplier evaluation and management system for strategic sourcing based on a new multicriteria sorting procedure. *International Journal of Production Economics*, 106(2):585–606, 2007.
- [2] J.R. Birge and F. Louveaux. *Introduction to stochastic programming*. Springer-Verlag, 1997.

- [3] J. Brans and B. Mareschal. Promcalc & gaia: a new decision support system for multicriteria decision aid. *Decision Support Systems*, 12, 1994.
- [4] J.P. Brans and Ph Vincke. A preference ranking organisation method: The promethee method for mcdm. *Management Science*, 31(6):647–656, 1985.
- [5] F. García-Torres C. Bordons and Luis Valverde. Gestión óptima de la energía en microrredes con generación renovable. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 12:117–132, 2015.
- [6] N. Meskens D. Duvivier and M. Ahues. A fast multicriteria decision-making tool for industrial scheduling problems. *Int. J. Production Economics*, 145:753–760, 2013.
- [7] A. H. Etemadi C. A. Canizares R. Iravani M. Kazerani A. H. Hajimiragha O. Gomis-Bellmunt M. Saeedifard R. Palma-Behnke G. A. Jiménez-Estévez D. E. Olivares, A. Mehrizi-Sani and N.D. Hatziargyriou. Trends in microgrid control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(4):1905–1919, 2014.
- [8] M. Esmaili and A. Goldoust. Multi-objective optimal charging of plug-in electric vehicles in unbalanced distribution networks. *Electrical Power and Energy Systems*, 73:644–652, 2015.
- [9] Electric Power Research Institute. Open-source distribution system simulator (openss).
- [10] J. Jozefowska and A. Zimniak. Optimization tool for short-term production planning and scheduling. *International Journal of Production Economics*, 112(1):109–120, 2008.
- [11] B. Lasseter. Microgrids (distributed power generation). In *Proc. IEEE Power Engineer. Soc. Winter Meet*, 1:146–149, 2001.
- [12] Turismo y Agenda Digital Ministerio de Energía. Smart grids y la evolución de la red eléctrica. *Informe publicado*, 2011.
- [13] J.M. Morales, R. Mínguez, and A.J. Conejo. A methodology to generate statistically dependent wind speed scenarios. *Applied Energy*, 87:843–855, 2010.

Percibiendo el entorno en los robots sociales del RoboticsLab

Fernando Alonso-Martín
University Carlos III of Madrid
famartin@ing.uc3m.es

José Carlos Castillo
University Carlos III of Madrid
jocastil@ing.uc3m.es

Álvaro Castro-González
University Carlos III of Madrid
acgonzal@ing.uc3m.es

Juan José Gamboa
University Carlos III of Madrid
jgamboa@ing.uc3m.es

Marcos Maroto
University Carlos III of Madrid
marmarot@pa.uc3m.es

Sara Marqués Villaroya
University Carlos III of Madrid
smarques@ing.uc3m.es

Antonio J. Pérez Vidal
University Carlos III of Madrid
100355616@alumnos.uc3m.es

Miguel Ángel Salichs
University Carlos III of Madrid
salichs@ing.uc3m.es

Resumen

La percepción del entorno es un aspecto clave para cualquier robot que tenga que interactuar con el mundo, objetos y personas de su entorno. Por este motivo, el campo de la percepción sensorial tiene una gran importancia. Este artículo describe los mecanismos empleados para dotar a los robots sociales del RoboticsLab, de la Universidad Carlos III de Madrid, de la capacidad de percibir el entorno. Desarrollos recientes en tecnologías sensoriales y algoritmos han permitido en los últimos años alcanzar un nivel de percepción cercano al de los humanos en algunas situaciones. La capacidad de percibir el entorno comprende áreas de investigación tan diversas como: la detección y reconocimiento de objetos, lugares, y personas; el procesamiento del lenguaje natural; la detección, localización, y reconocimiento de los toques producidos por los usuarios con el robot; el análisis del nivel de “enganche” en la interacción del usuario con el robot, etc. En este artículo incluimos una descripción de los tipos de sensores equipados en los robots, los módulos software desarrollados, y el gestor de la percepción que logra empaquetar y unificar temporalmente la información suministrada por cada uno de estos en diferentes niveles de abstracción de la información percibida.

Keywords—Robótica social, percepción automática, gestor de la percepción, interacción humano-robot

1. Introducción

El éxito de la Interacción Humano-Robot (HRI, por sus siglas en inglés) depende en gran parte de la capacidad que tengan los robots sociales de percibir el entorno que les rodea. Es por ello, el interés en desarrollar y mejorar las técnicas que permiten llevarla a cabo. Es en este ámbito de la percepción donde se están produciendo numerosos avances que han permitido, entre otras cosas, conseguir vehículos con auto-pilotaje, automatizar completamente cadenas de producción, etc. Sin embargo, su aplicación en robótica social resulta complejo, debido a la enorme cantidad de campos de investigación que involucra, tales como: reconocimiento

de voz, procesamiento del lenguaje natural, visión artificial, balizas electrónicas, y un largo etcétera.

El trabajo en este campo se centra en desarrollar nuevos sensores, nuevos algoritmos que usen estos nuevos sensores o los ya existentes, y nuevas arquitecturas de fusión de la información multisensorial (también conocida información multimodal). La amalgama de sensores que se pueden aplicar en este campo es extensa: cámaras de color, de temperatura, de profundidad; micrófonos de aire o de contacto; sensores táctiles como son los capacitivos, resistivos, piezoeléctricos; acelerómetros, giróscopos, sensores de temperatura y luminosidad; etc. Esta diversidad de sensores y métodos, unido al creciente interés en su desarrollo para su aplicación en todo tipo de dispositivos electrónicos y por supuesto en robots, convierte a la percepción automática en campo de investigación en constante crecimiento.

En este artículo se expone de manera concisa los mecanismos métodos que se aplican en los robots sociales del RoboticsLab de la Universidad Carlos III de Madrid para dotarles de la capacidad de percibir el entorno que les rodea. Reseñar que los métodos empleados están en consonancia con el estado del arte en esta área. El artículo continúa con un recorrido por la literatura relacionada en la sección 2. En la sección 3 se describen los robots del grupo, los sensores, los métodos para procesar la información sensorial obtenida, y la arquitectura de fusión empleados en nuestros robots sociales. Finalmente, en la sección 4 se presentan las conclusiones del trabajo desarrollado.

2. Trabajos relacionados

Los sistemas de percepción en robótica social tienen gran importancia dado que las capacidades de interacción y el conocimiento del entorno del robot dependen en gran medida de ellos. Existen numerosos trabajos que combinan información de uno o más sensores para conseguir este objetivo. Entre los robots con una percepción sencilla encontramos el robot Aibo [1] integra una serie de botones en el cuerpo que utilizaba para conocer la presencia de usuarios o el robot RHINO [2], que

también interactúa con las personas a través de una serie de botones.

Existen otros ejemplos de robots sociales que integran sistemas de percepción más sofisticados capaces de detectar automáticamente los usuarios y objetos a su alrededor. En esta línea, el robot Kismet [3] es capaz de detectar la cara y los ojos de las personas frente a él. Además, este robot está equipado con un sistema de reconocimiento de voz. El robot ALIAS [4] posee capacidades similares al anterior, detectando la cara de los usuarios y realizando análisis de voz. Adicionalmente, este robot incorpora una tableta para HRI.

En el caso de los robots presentados en el proyecto MOnarCH [5], estos disponen de mecanismos de percepción tanto para navegación por el entorno como para interacción. En el primer caso, los robots utilizan información de sensores láser y odometría para desplazarse. La percepción para interacción se realiza a través de sensores de tacto colocados en el robot, una pantalla táctil, análisis de voz y cámaras externas.

Aparte de realizar simplemente detección de los usuarios alrededor del robot, hay sistemas de percepción que permiten el reconocimiento y seguimiento de las personas. Este es el caso de plataformas como Valerie [6], un robot recepcionista que utiliza tarjetas magnéticas para reconocer a los usuarios. En el caso del robot Jibo ¹, se realiza un reconocimiento de rostros para diferenciar a los usuarios, así como análisis de voz.

En Springer Handbook of Robotics'16 [7] se presenta un extenso meta-análisis del estado del arte en cuanto a métodos de percepción en robots. En él, se describen y analizan los siguientes mecanismos de percepción: sensores para percibir el tacto, sensores de odometría y posicionamiento, cámaras de profundidad para navegación, manipulación, reconocimiento de objetos. Finalmente, se dedica un capítulo a los mecanismos de fusión de la información sensorial percibida en instantes temporales, tanto métodos, como arquitecturas, y aplicaciones de las mismas. En cuanto a métodos para realizar la fusión de la información sensorial se propone el uso de teoría bayesiana, mallas probabilísticas, filtro de Kalman, métodos basados en Monte Carlos. Por otro lado, se presentan varias arquitecturas de fusión como: Distributed Field Robot Architecture (DFRA) [8], Sensor Fusion Effects (SFX) [9], SEPIA [10], MESSIE (Multi Expert System for Scene Interpretation and Evaluation) [11], Active Sensor Network (ASN) [12].

3. Nuestro sistema de percepción

3.1. Los robots sociales

El grupo de robots sociales de la Universidad Carlos III de Madrid ha desarrollado tres plataformas robóticas de investigación en Interacción Humano-Robot (HRI). El primero de ellos, el robot Maggie [13], es el más antiguo de los tres y su principal objetivo ha sido interactuar con niños de entre 4 a 14 años. El robot Mini [14] sirve como plataforma de investigación en interacciones con ancianos con problemas cognitivos. Por último el robot Mbot [15], desarrollado durante el proyecto MOnarCH², se ha destinado a la interacción con niños en la planta pediátrica del hospital oncológico de Lisboa (ver figura 1).



Figura 1: Los robots sociales del RoboticsLab. Arriba, robot Maggie. Centro, robot Mini. Abajo, robot Mbot.

¹Sitio web de Jibo: <https://www.jibo.com>

²Sitio web del proyecto MOnarCH: <http://monarch-fp7.eu/>

3.2. Sensores empleados

Los robots sociales del RoboticsLab están dotados de numerosos sensores que son empleados por los módulos de percepción para “conocer” el entorno que les rodea. A continuación se presenta una enumeración y breve descripción del conjunto de sensores empleados:

Los **micrófonos “de aire”** son los más extensamente usados en robótica y son empleados tradicionalmente para tareas fundamentalmente de procesamiento del lenguaje natural (NLP, por sus siglas en inglés). Por tanto, los principales usos son el reconocimiento de voz, identificación del hablante, identificación de la emoción del hablante. Adicionalmente, se pueden emplear micrófonos para tareas de localización de la fuente de sonido y para analizar el nivel de excitación sonora (*arousal*) del entorno. El emplazamiento y la elección del modelo concreto de micrófono debe ser analizado en profundidad para cada caso. En este sentido, existen multitud de tipos de micrófonos en función del empleo que se quiera hacer del mismo. En el caso de aplicarse fundamentalmente para tareas de reconocimiento automático del habla conviene el uso de micrófonos especialmente diseñados para esta tarea. Además, se deberán integrar en el robot en la posición más ventajosa para evitar, en la medida de lo posible, los ruidos producidos por el propio robot (altavoces, motores, etc.) y al mismo tiempo captar la voz de los posibles usuarios con claridad.

Los **micrófonos “de contacto”** en nuestro caso son empleados para dotar a los robots de “sentido del tacto”, es decir para detectar y reconocer que tipo de contactos produce el usuario sobre la superficie del robot. Estos micrófonos son muy sensibles a captar cualquier vibración sonora propagada por un cuerpo sólido. Aprovechando esta propiedad es posible analizar el tipo de contacto que se produce cuando los usuarios tocan al robot. Este análisis, usando técnicas de aprendizaje automático, permite clasificar el tipo de contacto realizado, así como localizar en que zona del robot se ha producido (ver figura 2).

Los **sensores táctiles capacitivos** proporcionan información menos rica que los micrófonos de contacto en el sentido de que su señal es normalmente binaria (toque vs no toque). Aún así, por su sencillez y bajo coste, se integra esta tecnología en nuestros robots para dotar a los robots de la posibilidad de detectar toques donde los micrófonos de contacto no son factibles (p. ej. en partes del cuerpo del robot con fuentes de ruido próximas como motores).

Las **cámaras** son empleadas por los algoritmos de



Figura 2: Principales sensores de nuestros robots: Arriba, izquierda, micrófono de contacto usado como sensor de tacto; Arriba, derecha, cámara Creative Sens3D; En el medio, izquierda, LeapMotion; En el medio, derecha, telémetro láser Hokuyo. Abajo, las balizas electrónicas.

visión artificial en tareas como el reconocimiento de personas, objetos, lugares, emociones, y poses. En nuestros robots se integran cámaras RGB tradicionales y cámaras de profundidad como la *Kinect* (I y II), *Creative Sens3D* (ver figura 2), y *Softkinetic DepthSense*. Además de las cámaras incorporadas en los propios robots, suele ser habitual el uso de cámaras posicionadas directamente en el entorno de trabajo del robot, en nuestro caso empleamos cámaras omnidireccionales tanto en el laboratorio como en las áreas donde se suelen mover los robots.

El dispositivo **LeapMotion**³ (ver figura 2) es un tipo especial de cámara empleada para interacciones a menos de 1.5 metros. Normalmente, y en nuestro caso también, es empleado para detectar los gestos realizados por los usuarios con las manos. Basándonos en su uso hemos desarrollado el tradicional juego de “piedra, papel, o tijera” entre los usuarios y nuestros robots.

El uso del **magnetómetro** o **brújula** es llevado a cabo para detectar variaciones en el campo magnético. Esto puede permitir al robot localizarse en el entorno. Esta tecnología hace uso de lo que se conoce como “huella magnética del edificio”. Los **acelerómetros** y **giróscopos** permite detectar si

³www.leapmotion.com

el robot ha sido levantado o si ha sufrido una caída no programada.

Los **telémetros** como el láser, sonar, o infrarrojos son empleados para medir distancias del robot respecto a los objetos y/o personas que le rodean (ver figura 2).

Las **balizas electrónicas** proporcionan información acerca de los usuarios alrededor del robot (ver figura 2). Estos elementos no son capaces de dar una posición exacta, sino que aportan una estimación de la distancia de la baliza al receptor, siendo posible establecer la posición de los usuarios dentro de zonas concéntricas. Asimismo, las balizas permiten la identificación de los usuarios [16].

Al igual que los sensores de tacto, las **pantallas táctiles** proporcionan información acerca de la interacción de los usuarios con una pantalla, mitigando los problemas de reconocimiento asociados a los sistemas NLP a la hora de proporcionar información. Además, estos dispositivos proporcionan un soporte gráfico que aumentan las posibilidades de interacción del robot, pudiendo mostrar contenido multimedia, información variada o realizar juegos con el usuario.

Podrían emplearse sensores adicionales como barómetros, cámaras de temperatura, de huella dactilar, de luz, etc. Sin embargo, para los módulos que se han desarrollado y que a continuación presentamos, no han resultado necesarios.

3.3. Módulos desarrollados para percibir el entorno

Los robots sociales del grupo están dotados de técnicas que combinan desarrollos software con hardware para percibir el entorno. En concreto los módulos que se han desarrollado para dicha percepción son los que enumeramos a continuación:

1. Detección y reconocimiento de personas [17]: en la literatura podemos encontrar el empleo de diferentes sensores y métodos para esta tarea, las más habituales son mediante el empleo de técnicas basadas en visión artificial, a través del análisis del tono de voz del usuario, o mediante el uso de balizas electrónicas. En nuestro caso, es precisamente mediante la combinación de estos tres modos como llevamos a cabo esta tarea.
2. Detección y reconocimiento de objetos: de igual forma que en el caso anterior, mediante el empleo de algoritmos basados en el análisis de las imágenes obtenidas por las cámaras del robot, tanto de color como de profundidad, es posible la detección y el reconocimiento de los

objetos, previamente conocidos, que rodean al robot.

3. Detección y reconocimiento de lugares: mediante técnicas, normalmente aplicadas a tareas de navegación, es posible localizar el robot en el entorno, identificando la sala en la que se encuentra.
4. Detección y reconocimiento de emociones en los usuarios [18]: mediante técnicas basadas en el análisis facial de los rostros de los usuarios, así como otras técnicas basadas en el análisis de la voz, e incluso imágenes de temperatura, es posible clasificar la emoción de los usuarios.
5. Detección y reconocimiento de poses/gestos de los usuarios: es posible reconocer gestos realizados por los usuarios como saludos, despedidas, etc. Para ello se suele emplear técnicas basadas en el análisis del esqueleto del usuario en secuencias de imágenes continuas [19]. Asimismo, dispositivos como el LeapMotion proporcionan información acerca de los movimientos de las manos a través de técnicas de clasificación, que se pueden explotar para interacción [20].
6. Evaluación del nivel de “enganche” (*engagement*) de los usuarios con el robot: es de gran interés conocer cuando los usuarios prestan atención al robot durante la interacción o por contra la interacción para ellos carece de interés. Para analizar el enganche se suelen tener en cuenta aspectos como el número de veces que el usuario mira al robot, el número de turnos de diálogo, el grado de consecución de los objetivos marcados en la interacción, etc.
7. Detección y reconocimiento de “toques” de los usuarios en el robot [21]: los robots sociales suelen estar dotados de la capacidad de detectar cuando el usuario toca, al menos, una parte determinada del robot, por ello existe multitud de sensores y algoritmos para llevar a cabo esta tarea. En recientes trabajos hemos presentado un sistema para detectar, reconocer, y localizar el tipo de toque realizado en cualquier parte del robot. Para ello, nos hemos valido de micrófonos y técnicas de análisis de audio y aprendizaje automático.
8. Procesamiento del lenguaje natural (detección de actividad de voz [22], reconocimiento de voz. [23], enriquecimiento semántico [24]): es deseable que el robot sea capaz de comprender y generar el lenguaje natural, para interaccionar por voz con el usuario de manera satisfactoria.

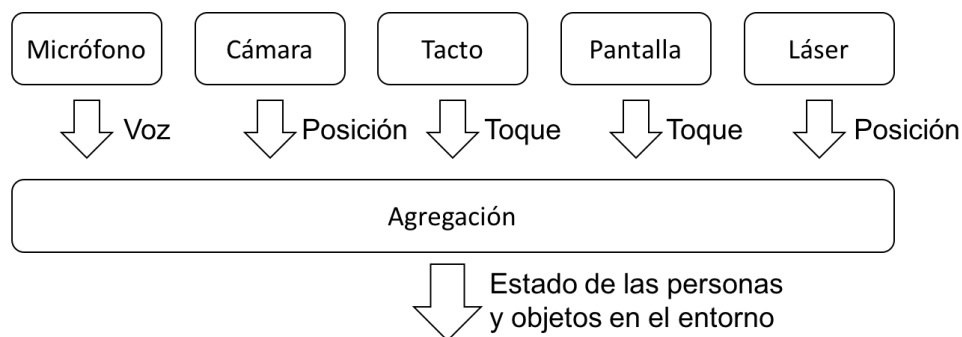


Figura 3: Módulo de agregación. La información proveniente de los módulos de procesamiento de los sensores se unifica para proporcionar información de más alto nivel acerca del estado de las personas y objetos en el entorno.

Cada uno de estos módulos emplea sensores y algoritmos que han sido descritos en profundidad en los artículos citados.

3.4. Agregación

El módulo de agregación se encarga de recibir los datos procesados por los módulos sensoriales y relacionarla para proporcionar la información relativa al entorno en cada momento. Recordemos que esta información es relativa a los usuarios y objetos que rodean al robot, la posición del robot, la emoción de los usuarios, etc. El objetivo de este módulo es empaquetar y entregar esta información en paquetes temporales con cierta coherencia temporal y fusionar fuentes de información complementarias. Este tipo de procesamiento involucra procesar información procedente de varios modos o módulos perceptivos simultáneamente a lo largo de un largo periodo de tiempo. La figura 3 muestra un ejemplo de la arquitectura de percepción con algunos de los módulos descritos en la sección 3.3.

La implementación de cada nivel de fusión de información se puede realizar fundamentalmente siguiendo dos posibles aproximaciones. La primera de ella consiste en establecer reglas de manera manual, normalmente mediante experimentos y pruebas de campo. La segunda aproximación podría establecer reglas automáticamente usando técnicas de aprendizaje automática e inteligencia artificial usando un conjunto de datos de entrenamiento y validación. Una aproximación híbrida entre la manual y la automática también se puede plantear como una alternativa válida.

En nuestro caso hemos desarrollado ambas aproximaciones. Reseñar que ciertos módulos sensoriales anteriormente mencionados internamente también incorporan mecanismos para fusionar información obtenida por varios sensores diferentes o por varios clasificadores. A modo de ejemplo el sistema de de-

tección de usuarios incorpora un Filtro de Kalman Extendido. El sistema de detección de emociones implementa un algoritmo de fusión bayesiano que le permite mezclar la información que suministran los algoritmos basados en visión con los basados en sonido.

4. Conclusiones

En este artículo hacemos una revisión completa del conjunto de técnicas empleadas para dotar a los robots sociales del RoboticsLab de ciertas capacidades sensoriales que les permiten percibir su entorno. Esta revisión incluye enumerar y describir los principales sensores empleados en los robots sociales, el conjunto de módulos perceptivos, así como el gestor de la percepción que permite mezclar la información suministrada por estos módulos perceptivos.

El objetivo final es que los robots sociales sean capaces de interactuar de manera natural con los humanos, y para ello es fundamental lograr que nuestros robots tengan capacidades sensoriales similares a las de los humanos. El conjunto de capacidades humanas, que de alguna forma se tratan de imitar, es amplio. Entre estas capacidades se encuentran las de detectar y reconocer con que humanos interactúan, que objetos les rodean, y en que lugar se encuentran. La de procesar el lenguaje natural, reconociendo y entendiendo el mensaje verbalmente transmitido por los usuarios. La de detectar y comprender los toques que realizan los usuarios sobre la superficie del robot. Detectar y clasificar las emociones de los usuarios que se generan durante la interacción, así como evaluar el grado de enganche del usuario con el robot.

El uso de estas capacidades sensoriales, inspiradas en las propias de los humanos, permite interacciones multimodales que usan varios modos/canales de interacción, como son: la voz, el tacto, el uso

de gestos, expresiones faciales, etc.

Agradecimientos

La investigación desarrollada ha recibido financiación de dos proyectos: “Development of social robots to help seniors with cognitive impairment” (ROBSEN), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad; y “RoboCity2030-III-CM”, financiado por la Comunidad de Madrid y cofinanciado por los Fondos Estructurales de la Unión Europea.

Referencias

- [1] Y. Moon, S. Dutta, and S. Oundhakar, *Sony AIBO: The world's first entertainment robot*. Harvard Business School Pub, 2005.
- [2] W. Burgard, A. Cremers, and D. Fox, “The interactive museum tour-guide robot,” in *Proceedings of the 15th national/10th conference on Artificial intelligence/Innovative applications of artificial intelligence*, pp. 11–18, 1998.
- [3] C. Breazeal and B. Scassellati, “A context-dependent attention system for a social robot,” in *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, vol. 2, pp. 1146–1151, 1999.
- [4] J. Geiger, T. Leykauf, and T. Rehrl, “The Robot ALIAS as a Gaming Platform for Elderly Persons,” *Lebensqualität im Wandel von Demografie und Technik - 6. Deutscher AAL-Kongress mit Ausstellung*, 2013.
- [5] M. I. Aldinhas and J. Sequeira, “Designing a robotic interface for children: The monarch robot example,” in *Advances in Cooperative Robotics*, pp. 652–659, World Scientific, 2017.
- [6] R. Gockley, A. Bruce, J. Forlizzi, M. Michalowski, A. Mundell, S. Rosenthal, B. Sellner, R. Simmons, K. Snipes, A. C. Schultz, and J. Wang, “Designing robots for long-term social interaction,” in *2005 IEEE/RSJ IROS*, pp. 2199–2204, 2005.
- [7] M. Hägele, K. Nilsson, J. N. Pires, and R. Bischoff, *Industrial Robotics*. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [8] M. Long, A. Gage, R. Murphy, and K. Valavanis, “Application of the distributed field robot architecture to a simulated demining task,” in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2005, pp. 3193–3200, IEEE, 2005.
- [9] R. Murphy and R. Arkin, “SFX: An Architecture For Action-oriented Sensor Fusion,” in *IROS*, pp. 1079–1086, 1992.
- [10] L. Tolbert, H. Q. H. Qi, and F. Peng, “Scalable multi-agent system for real-time electric power management,” *2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)*, vol. 3, pp. 1–4, 2001.
- [11] P. Giraudon, G., Garnesson, P., y ONTESINOS, “MESÍAS : un multi-especialista en sistema de visión. ApplicationA interpretación de las imágenes aéreas,” *Procesamiento de Señales*, vol. 9, no. 5, pp. 403–419, 1992.
- [12] A. Makarenko and H. Durrant-Whyte, “Decentralized data fusion and control in active sensor networks,” in *Proceedings of the Seventh International Conference on Information Fusion*, vol. 1, pp. 479–486, 2004.
- [13] M. A. Salichs, R. Barber, A. M. Khamis, M. Malfaz, J. F. Gorostiza, R. Pacheco, R. Rivas, A. Corrales, E. Delgado, and D. Garcia, “Maggie: A robotic platform for human-robot social interaction,” in *2006 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, pp. 1–7, June 2006.
- [14] Á. Castro-González, J. C. Castillo, F. Alonso-Martín, O. V. Olortegui-Ortega, V. González-Pacheco, M. Malfaz, and M. A. Salichs, “The effects of an impolite vs. a polite robot playing rock-paper-scissors,” in *International Conference on Social Robotics*, pp. 306–316, Springer, 2016.
- [15] V. González-Pacheco, Á. Castro-González, M. Malfaz, and M. A. Salichs, “Human robot interaction in the monarch project,” in *Proc. 13th Workshop Robocity2030*, pp. 1–8, 2015.
- [16] F. Alonso-Martín, A. Castro-González, M. Malfaz, J. C. Castillo, and M. A. Salichs, “Identification and distance estimation of users and objects by means of electronic beacons in social robotics,” *Expert Systems with Applications*, 2017.
- [17] F. Alonso-Martín, A. Ramey, and M. Á. Salichs, “Speaker identification using three signal voice domains during human-robot interaction,” in *Proceedings of the 2014 ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction - HRI '14*, (Bielefeld (Germany)), pp. 114–115, ACM Press, mar 2014.

- [18] F. Alonso-Martin, M. Malfaz, J. Sequeira, J. Gorostiza, and M. A. Salichs, "A Multimodal Emotion Detection System during Human-Robot Interaction," *Sensors*, vol. 13, no. 11, pp. 15549–15581, 2013.
- [19] V. Gonzalez-Pacheco, M. Malfaz, J. C. Castillo, A. Castro-Gonzalez, F. Alonso-Martín, and M. A. Salichs, "How much should a robot trust the user feedback? analyzing the impact of verbal answers in active learning," in *International Conference on Social Robotics*, pp. 190–199, Springer, 2016.
- [20] Á. Castro-González, J. C. Castillo, F. Alonso-Martín, O. V. Olortegui-Ortega, V. González-Pacheco, M. Malfaz, and M. A. Salichs, "The effects of an impolite vs. a polite robot playing rock-paper-scissors," in *International Conference on Social Robotics*, pp. 306–316, Springer International Publishing, 2016.
- [21] F. Alonso-martín, J. C. Castillo, J. J. Gamboa, and M. Á. Salichs, "Acoustic Sensing for Touch Recognition in a Social Robot," in *Proceedings of the Companion of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction* (ACM, ed.), (Viena), pp. 65–66, 2017.
- [22] F. Alonso-Martin, Á. Castro-González, J. Gorostiza, and M. A. Salichs, "Multidomain Voice Activity Detection during Human-Robot Interaction," in *International Conference on Social Robotics (ICSR 2013)*, pp. 64–73, Bristol: Springer International Publishing, 2013.
- [23] F. Alonso-Martin and M. Salichs, "Integration of a voice recognition system in a social robot," *Cybernetics and Systems*, vol. 42, pp. 215–245, may 2011.
- [24] F. Alonso-Martín, A. Castro-González, F. Luengo, and M. Salichs, "Augmented Robotics Dialog System for Enhancing Human–Robot Interaction," *Sensors*, vol. 15, pp. 15799–15829, jul 2015.

DISEÑO DE UNA PRÓTESIS DE MANO ADAPTABLE AL CRECIMIENTO

Marta Ayats

Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials (IOC)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona < marta.ayats@alumnes.upc.edu>

Raúl Suárez

Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials (IOC)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona <raul.suarez@upc.edu>

Resumen

En este artículo se presenta el diseño de una prótesis de mano que se adapta al crecimiento del usuario, desde los 4 años hasta la edad adulta. Se ha considerado en el diseño el estudio de las necesidades de los pacientes y el estudio de las medidas antropométricas de los usuarios en la edad de crecimiento. El diseño incluye únicamente la estructura externa y los mecanismos de movimiento, así pues no se ha incluido en este trabajo el diseño del control ni de la electrónica.

Palabras Clave: Mano protésica, prótesis adaptable, prótesis pediátrica.

1 INTRODUCCIÓN

La Asociación Nacional de Amputados calcula que en 2002 había en España un total de 46.886 personas con amputaciones. Un 14% de estas tienen una deficiencia de miembro superior desde el nacimiento, significando esto que en 2002 había 8.845 personas con necesidad de utilizar prótesis desde el nacimiento. Debe hacerse notar que no existen datos oficiales más actuales al respecto.

Estudios realizados en el hospital Sant Joan de Déu [2] afirman que si un niño que nace sin mano alcanza los tres meses de vida sin este miembro, fijará en su cerebro una idea de bimanualidad (concepto de igual longitud de los brazos) distorsionada. Para evitarlo, a los bebés que carecen de una mano desde el nacimiento se les enseña desde pequeños a hacer uso de una mano protésica puramente estética y sin funcionalidad, que les ayuda a incorporar en su cerebro el concepto de igualdad de longitud entre los dos brazos. Antes de cumplir los 2 años, la mano cosmética es substituida por una prótesis que les permite agarrar objetos con tres dedos: anular, índice y pulgar. A medida que el usuario aprende a utilizar las prótesis, el nivel de complejidad de esta se va aumentando, hasta que a

los 13-14 años el paciente ya empieza a utilizar prótesis de adultos.

El precio de las prótesis mioeléctricas más avanzadas del mercado oscila entre 36.000 y 40.000 euros y la seguridad social española aporta unos 10.000 euros en el caso de los niños y unos 18.000 euros en el caso de los adultos, afirma personal de la Unidad Integral de Atención al Niño Amputado del Hospital Sant Joan de Déu de Barcelona [1].

Uno de los problemas que existe en el mercado de prótesis para niños es que cuando estos crecen sus cuerpos cambian y las prótesis les quedan pequeñas pero, aunque los más pequeños experimentan muchos cambios físicos en periodos cortos de tiempo, es una equivocación reemplazar la prótesis cada pocos meses, ya que el niño necesita un tiempo para adaptarse a la nueva prótesis y esto además implicaría un impacto económico enorme para sus familias.

Es a raíz de esto que se planteó una pregunta: ¿Qué pasaría si existiera una prótesis que se adaptara al crecimiento del niño? Esto implicaría una mejora significativa en la vida del usuario de la prótesis, ya que podría utilizar desde edades tempranas prótesis con mejores funcionalidades, que aunque tienen precios más elevados el aumento de precio queda compensado por el hecho de que se puede utilizar la misma prótesis durante toda la etapa de crecimiento. Esto no solo tiene un impacto económico sino también a nivel de practicidad para el usuario, éste no ha de adaptarse de forma casi anual a una nueva prótesis sino que es la prótesis la que se adapta al usuario.

2 ESTUDIO DE LA MANO HUMANA

Para definir las necesidades de la prótesis se ha hecho un estudio de la mano humana especialmente de los límites de movimiento de los dedos, de los movimientos coordinados básicos y de las características antropométricas.

2.1 MOVIMIENTOS ARTICULARES

La mano humana tiene 3 grupos de articulaciones, la articulación trapezometacarpiana del pulgar, las articulaciones metacarpofalángicas y las articulaciones interfalángicas, teniendo cada grupo unos límites de movimiento distintos.

La articulación trapezometacarpiana del pulgar es la articulación entre la palma de la mano y el dedo pulgar, cuyos límites de movimiento son 90° para el movimiento de extensión y 70° para el movimiento de abducción (Figura 1) [6].

Las articulaciones metacarpofalángicas son las articulaciones entre los dedos y la palma. En el caso de los dedos índice al meñique, los límites de movimiento son 90° para la flexión, entre 30° y 45° para la extensión y 20° para los movimientos de abducción y aducción (Figura 2). En cuanto a la articulación metacarpofalángica del pulgar, los límites de movimiento son 50° para la flexión y 0° para la extensión (Figura 3).

Finalmente, en el caso de las articulaciones interfalángicas, los límites de movimiento son para la flexión de entre 90° y 100° en función de la falange y para la extensión entre 0° y 20° (Figura 4).

2.2 MOVIMIENTOS COORDINADOS BÁSICOS

Una vez estudiados los límites de movimiento de las articulaciones se ha hecho un estudio de los movimientos coordinados básicos [5]: agarre cilíndrico, agarre de punta, agarre de gancho, agarre de palma, agarre esférico y agarre de lado. Estos movimientos coordinados básicos permiten definir las acciones independientes que ha de realizar la prótesis, que son: abducción y aducción del pulgar, flexión y extensión del pulgar y flexión y extensión de los dedos índice hasta el meñique.

2.3 ANTROPOMETRÍA

Finalmente, para poder realizar un diseño que se adapte al crecimiento de los niños desde los 4 años hasta su edad adulta se ha hecho un estudio antropométrico con la finalidad de definir el rango de medidas a las que se tendrá que adaptar la prótesis.

Con respecto a la palma, se ha estudiado su ancho y su largo. La medida del ancho (V) es la distancia que hay entre la parte interior y exterior a la altura de los nudillos y el largo de la palma (Y) es la distancia en dirección perpendicular entre el nudillo del dedo anular y la muñeca (Figura 5)

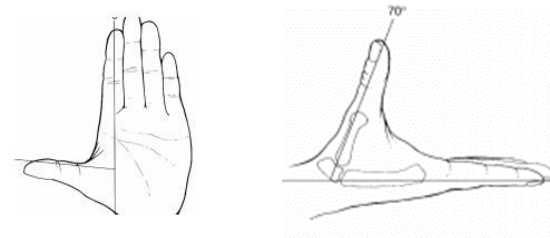


Figura 1: A la izquierda movimiento de extensión, a la derecha movimiento de abducción de la articulación trapezometacarpiana.

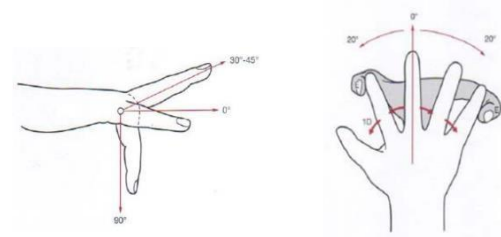


Figura 2: Límites de movimiento para la articulación metacarpofalángica de los dedos índice al meñique.

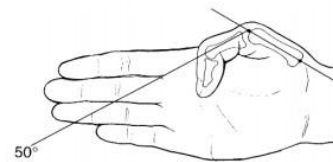


Figura 3: Límite de movimiento articulación metacarpofalángica del pulgar.

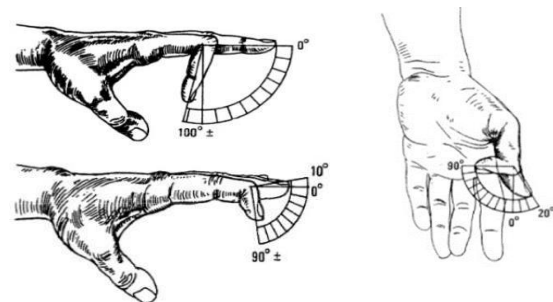


Figura 4: Límite de movimiento articulaciones interfalángicas.

El rango de valores obtenidos según [4] es $X \in [55,93]$ e $Y \in [65,120]$, ambos en milímetros. También se ha estudiado el grosor de la palma (Z), resultando $Z \in [20, 30]$ (Figura 5)

En cuanto a los dedos, los largos mínimos y máximos se muestran en la Tabla 1. Con respecto al grosor (W), el máximo encontrado es de 25 mm y el mínimo de 8 (Figura 5).

3 ESTADO DEL ARTE

Las prótesis de mano se dividen en dos grandes grupos: prótesis estéticas y prótesis funcionales. Las primeras son aquellas que como su nombre indica cumplen únicamente una función estética, es decir no pueden ejercer ningún tipo de movimiento. Las segundas, por lo contrario, pueden hacer movimientos varios. Las prótesis funcionales se dividen en 5 grandes grupos: mecánicas, mioeléctricas, eléctricas, neumáticas e híbridas, según la forma de transmitir el movimiento, siendo las mecánicas y las mioeléctricas las más utilizadas en el mercado actual.

A continuación se hace una descripción de los mecanismos de accionamiento utilizados para las prótesis de mano y del estado del mercado actual.

3.1 MECANISMOS DE ACCIONAMIENTO

Actualmente se están utilizando principalmente cuatro mecanismos de accionamiento: el basado en tendones, el que usa un motor en cada articulación, el de transmisión por poleas y el de barras. En este caso nos hemos centrado en el mecanismo basado en tendones, que, es un mecanismo de accionamiento que funciona como los tendones de los dedos de la mano humana. En el caso de la extensión con mecanismos de accionamiento basados en tendones, esta puede ser controlada o no controlada. En el primer caso, la extensión se realiza normalmente con muelles en las articulaciones, o bien con el recubrimiento de la articulación con un material elastomérico.

3.2 ESTUDIO DEL MERCADO ACTUAL

El mundo de las prótesis, tanto de miembro inferior como de miembro superior, ha evolucionado de forma acelerada en los últimos años, ya sea en investigación con nuevos materiales, en los actuadores, los movimientos, la estética, entre otros aspectos.

Esta evolución implica un aumento de precio de las prótesis. Es también importante destacar que en general la investigación se ha centrado en prótesis de

Tabla 1: Medidas del largo de los dedos.

Dedo	Mínimo [mm]	Máximo [mm]
Pulgar	39	54
Índice	60	82
Corazón	67	93
Anular	63	87
Meñique	49	68

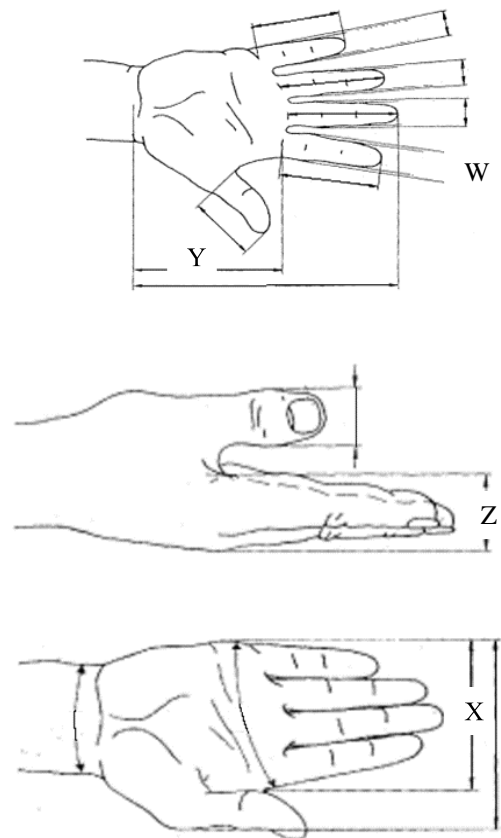


Figura 5: Medidas estudiadas en el estudio antropométrico.

mano para adultos, ya que, como se ha comentado anteriormente, en el caso de niños y adolescentes en etapa de crecimiento, el uso de la prótesis se reduce de hasta 10 años a solamente 1-2 años. Es por esto que el mercado de prótesis para adultos está muy desarrollado mientras que en el caso de prótesis para niños las opciones son más limitadas.



Figura 6: ejemplos de prótesis de mano pediátricas. a) UCLA CAPP de Hosmer; b) Child Dorrance 200 de Hosmer; c) 2000 de Ottobock; d) 99P de Hosmer; e) CHILD CAPP de Hosmer.

En la Figura 6 se muestran 5 prótesis de mano diseñadas para uso pediátrico, cuyos problemas principales son: la poca apertura del movimiento de pinza, el peso, la falta de opciones al escoger la medida que más se adapta al paciente y el precio que oscila entre los 9.000 y los 15.000 €.

La intención principal de este trabajo es diseñar una prótesis de mano que pueda tener las funcionalidades propias de una prótesis de mano para adultos, cuyo precio elevado quede compensado por la posibilidad de alargar la prótesis anualmente. Para hacerlo se propone un diseño que permite adaptar la medida de la prótesis mediante la adición de piezas. Este diseño podría usarse para las prótesis de mano para adultos ya existentes pudiendo ser utilizadas también para niños en su etapa de crecimiento.

4 DISEÑO PROPUESTO

Para hacer el diseño de la prótesis primero se han definido las características que ésta ha de cumplir.

Primero se ha decidido que la prótesis ha de ser lo más parecida posible a una mano real, es decir, tendrá 5 dedos con 3 articulaciones cada uno y una palma. También con el mismo propósito, esta ha de poder cubrirse con un guante de látex que la dará un color, grosor y textura similares a la mano del usuario.

En este diseño no se ha incluido la articulación de la muñeca, y se ha limitado el peso de la estructura exterior a 200 g, así, posicionando los motores y las baterías fuera de la mano (en el antebrazo o brazo) se reduce el peso de la prótesis.

En cuanto a los mecanismos de movimiento se ha decidido hacer un diseño basado en tendones con el mecanismo “Dogleg Link”. Finalmente, para el crecimiento de la prótesis se ha decidido diseñar una estructura modular, cuyas piezas sean independientes y puedan juntarse de la forma más adecuada para cada usuario.

4.1 DISEÑO DE LA PALMA

Como ya se ha comentado, se desea diseñar una prótesis modular, es decir que tenga unas piezas que puedan unirse de forma diferente para cada usuario.

Para la palma se han diseñado 6 piezas, 4 de estas son fijas y unidas forman la palma con las medidas mínimas encontradas en el estudio antropométrico. Esta palma inicial tiene medidas de 55 mm de ancho y 65 mm de largo (Figura 7).

Para hacer crecer la palma a lo ancho, se han diseñado piezas con 3 medidas distintas, de 3 mm, 5 mm y 10 mm de ancho. Estas piezas se posicionan como se muestra en la Figura 8 en el centro de la palma.

Para el crecimiento del largo de la palma se han diseñado 2 piezas. Una de ellas va posicionada en los extremos de la palma, variando el largo, mientras que la segunda va posicionada en la parte central (Figura 9). Esta segunda pieza ha de tener distintas medidas de ancho y de largo, para adaptar la palma al crecimiento en estas dos direcciones. Es por esto que la pieza central tiene 9 posibles medidas, según las combinaciones entre los largos 3, 5 y 10 mm y los anchos 3, 5 y 10 mm. En cuanto a la pieza lateral, esta tiene un largo que equivale a la mitad del ancho de la palma inicial y tres medidas de alto de 3, 5 y 10 mm.

4.2 DISEÑO DE LOS DEDOS

Primero se han diseñado unas piezas para el posicionamiento de los dedos en la palma. Estas piezas pueden verse en la Figura 10 y se han diseñado para poder posicionar los dedos en el lugar de la palma que más se adapte a las necesidades del usuario.

Una vez diseñada la pieza para el posicionamiento de los dedos, se ha pasado al diseño de estos. Después del estudio antropométrico se decidió diseñar todos los dedos con la medida mínima de ancho encontrada en el estudio, así, las personas con los dedos más finos podrán utilizar la prótesis y aquellas personas



Figura 7: Montaje de las piezas fijas de la palma.



Figura 8: Posicionamiento de las piezas para el crecimiento a lo ancho.

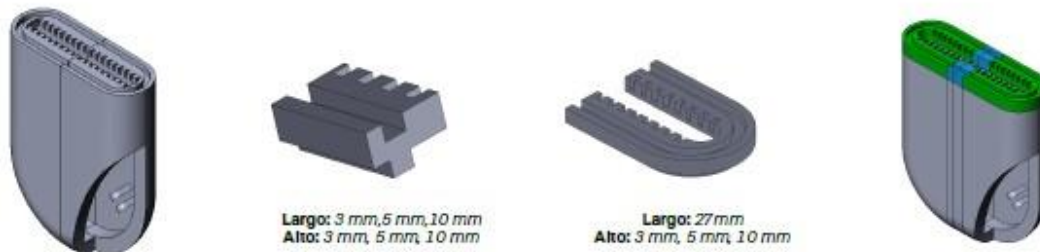


Figura 9: Posicionamiento de las piezas para el crecimiento a lo largo.

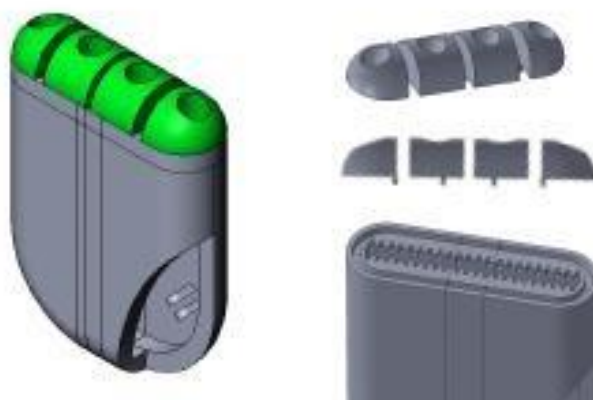


Figura 10: Piezas para el posicionamiento de los dedos índice al meñique.

con los dedos más gruesos simplemente tendrán que añadir más grosor al guante de silicona con el que se podrá cubrir la prótesis.

Cada falange está formada por la combinación de tres piezas, dos de ellas son piezas fijas que juntas tienen la longitud mínima de falange encontrada en el estudio antropométrico realizado, la tercera pieza es la que da la longitud que el usuario necesita. Esta pieza se ha fabricado con 3 medidas distintas (1 mm, 3 mm, 5 mm) y su posicionamiento en la falange puede verse en la Figura 11.

4.3 DISEÑO DEL MECANISMO DE MOVIMIENTO

El mecanismo de movimiento seleccionado es el basado en tendones, con la configuración *Dogleg link* (Figura 12). Para la flexión de los dedos índice al meñique se utiliza un solo motor que, mediante poleas, permitirá que todos los dedos ejerzan una misma presión sobre el objeto que se quiera agarrar.

Para la extensión se ha puesto un tendón elástico que, cuando el motor deje de ejercer par, mueva los dedos a su posición inicial.

4.4 CÁLCULO DE FUERZAS

Para tener una idea de cómo han de ser los actuadores que se han de utilizar para el movimiento de la mano se han realizado los cálculos de tensiones para todos los dedos.

Según [3] el promedio de fuerza que puede ejercer una persona adolescente es de 6 kg repartida entre los dedos índice al meñique, resultando una fuerza normal de 14,72 N a ejercer por cada uno de los dedos.

Una vez que se ha definido la fuerza de contacto máxima que podrán ejercer los dedos sobre el objeto que se desea agarrar, se ha calculado la fuerza de tensión que tendrá que realizar el actuador. En la Figura 13 se muestra el diagrama de distribución de fuerzas a partir del cual se ha calculado la fuerza T de tensión.

Esta fuerza T se ha calculado mediante el sumatorio de momentos respecto al punto B,

$$\sum M_B = 16N - 6T_y - 4T_x = 0 \quad (1)$$

De la ecuación 1 se ha obtenido el valor de T en función del ángulo α de flexión del dedo,

$$T = \frac{16N}{6\cos\alpha + 4\sin\alpha} \quad (2)$$

Con la ecuación 2 se ha calculado el valor de la tensión en las dos situaciones límite, la situación de flexión máxima del dedo ($\beta=90^\circ$) y la situación de extensión máxima del dedo ($\beta=180^\circ$), considerando que la tensión máxima a efectuar por el motor era de 58,88 N en la situación de extensión máxima.

Una vez que se ha calculado la fuerza de tensión que ha de recibir cada uno de los dedos, se ha calculado el par que ha de hacer el actuador mediante el diagrama de fuerzas que se muestra en la Figura 12 y que representa el mecanismo “Dogleg Link”. Suponiendo el peor de los casos, en que todas las tensiones transmitidas a los dedos por el motor están orientadas verticalmente, se obtiene que la fuerza máxima a ejercer por el motor es 4 veces la tensión, siendo esto equivalente a una F_{\max} de 235,5 N.

Para calcular el par que tendrá que ejercer el motor para que los tendones reciban la tensión máxima, se ha utilizado una polea de 1 cm de radio, dando un par motor de 2,35 Nm.

Los cálculos anteriores se refieren a los dedos índice al pulgar, y se ha seguido el mismo procedimiento para el cálculo de tensiones del dedo pulgar. En la Figura 14 se puede ver el diagrama de distribución de fuerzas, la tensión que se ha de ejercer sobre el dedo pulgar es función del ángulo de flexión,

$$T = \frac{22N}{13\cos\alpha + 4\sin\alpha} \quad (3)$$

Con la ecuación 3 se puede calcular la tensión máxima que ha de ejercer el motor para que el pulgar pueda realizar una fuerza de 14,72 N sobre el objeto que el usuario quiera agarrar, siendo esta tensión de 80,96 N.

Finalmente, mediante el mismo procedimiento que en el caso de los dedos índice al meñique, se ha calculado a partir de la tensión, el par motor a realizar por el actuador, siendo este de 0,81 Nm.

Así pues, la prótesis de mano tendrá que estar dotada de 2 motores, un motor para el movimiento de los dedos índice al meñique, con un par limitante de 2,5 Nm y un motor para el movimiento del pulgar con un par limitante de 0,81 Nm.



Figura 11: Posicionamiento de las piezas para el crecimiento a lo largo de las falanges.

4.5 ELECCIÓN DEL MATERIAL

Para la elección del material se han considerado 7 opciones: aluminio, fibra de carbono, titanio, nylamid, polímero de ABS, material compuesto de fibra de carbono y kevlar, y ortocarbono. Los criterios considerados para la selección del material ha sido principalmente la limitación del peso de la estructura a 200 g, la resistencia, el precio y la facilidad de obtención del material.

Así pues, la primera selección de materiales se hizo con la limitación de peso de 200 g y todos aquellos materiales que daban un peso mayor a la prótesis se han descartado.

Con esta primera selección, los materiales restantes son la fibra de carbono, el polímero de ABS, el ortocarbono y el material compuesto de fibra de carbono y kevlar. De entre estos 4 materiales, se descartó primero el ABS por ser el menos resistente y el ortocarbono por ser el más difícil de obtener, ya que se trata de un material en investigación. Finalmente, entre la fibra de carbono y el material compuesto de fibra de carbono y kevlar, se ha decidido utilizar el segundo, por tener unas muy buenas propiedades mecánicas y un precio muy parecido al de la fibra de carbono.

4.6 RESUMEN DEL DISEÑO

Se ha diseñado una prótesis de mano que se adapta al crecimiento de los niños, desde los 4 años hasta el final de su edad de crecimiento (Figura 15). El peso de la estructura de la prótesis es de 150 g y estaría fabricada con material compuesto de fibra de carbono y kevlar. El estudio de fuerzas y tensiones se ha hecho para que la mano pueda ejercer una presión de 6 kg repartidos entre los dedos del índice al meñique. La mano tiene tres movimientos independientes, movimiento de flexión y extensión de los dedos índice al meñique, movimiento de flexión y extensión del pulgar y movimiento de abducción y aducción del pulgar, pudiendo realizar tres tipos de agarre, el agarre en pinza, el agarre cilíndrico y el agarre de gancho (Figura 16).

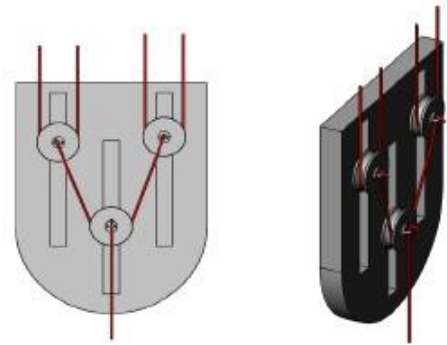


Figura 12: Mecanismo de transmisión *Dogleg Link*.

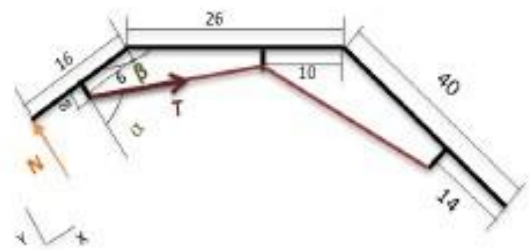


Figura 13: Esquema de fuerzas para el cálculo de las tensiones del dedo índice al meñique.

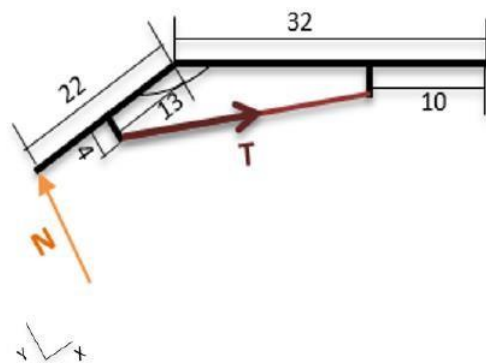


Figura 14: Esquema de fuerzas para el cálculo de las tensiones del pulgar.

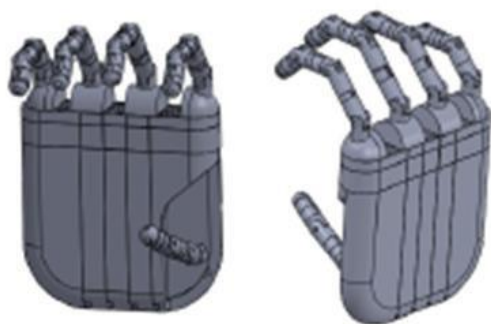


Figura 15: Diseño de prótesis de mano propuesto.

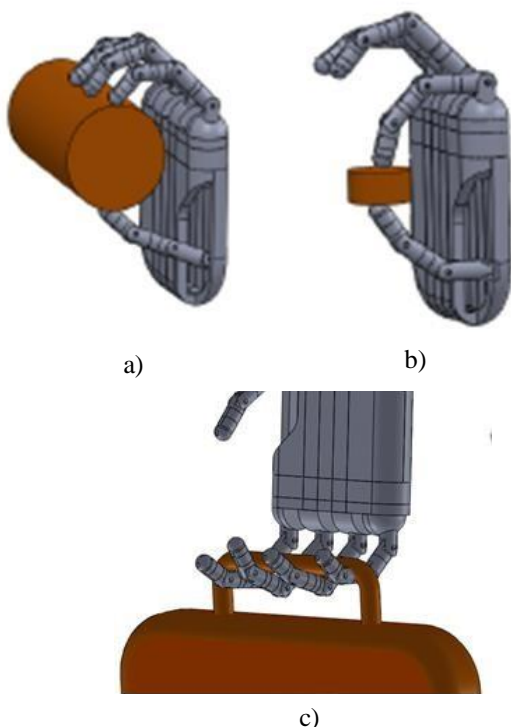


Figura 16: a) Agarre cilíndrico; b) agarre de pinza; c) agarre de gancho.

5 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Durante el estudio del estado del arte para el diseño de la prótesis se ha visto que existe una necesidad real de investigación en el mundo de la protésica pediátrica, tanto en nuevos materiales como en funcionalidades.

En el ámbito de la protésica pediátrica el crecimiento de los niños hace que sus prótesis no puedan tener tantas funcionalidades como las de los adultos porque esto implicaría un precio muy elevado, por ello se opta por hacer prótesis más básicas y que en muchos casos no cumplen las necesidades reales del usuario. Con el diseño propuesto podría hacerse una prótesis infantil con más funcionalidades y aunque el precio sea superior, este se compensa con una mayor vida útil del producto.

En cuanto al trabajo futuro, queda por hacer el diseño de la electrónica y el control, y construir posteriormente un prototipo, para que los posibles usuarios puedan probar si el mecanismo de crecimiento es adecuado, tanto para ellos como para sus familias.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Gobierno de España a través de los proyectos DPI2013-40882-P y DPI2016-80077-R.

Referencias

- [1] David Lloberas (2008), <http://www.europapress.es/catalunya/noticia-hospital-sant-joan-deu-implanta-primera-mano-bionica-adolescente-europa-20080122141447.html>
- [2] Marisa Cabrera, (2012) <http://www.elperiodico.com/es/noticias/sociedad/manos-magicas-2239033>
- [3] Pamela Escalona PA, Jannette Naranjo O, Veronica Lagos S y Fresia Solís F, (2009), Prámetros de prensión de mano en sujetos de ambos sexos de 7 a 17 años de edad.
- [4] Richard G.Snyder, Lawrence W. Sheider, Clyde L. Owings, (1978), *Infant, Child and Teenager Antropometry For Product Safety Design*.
- [5] Taylor G.L., Schwartz R.J., (1955), *The Anatomy and Mechanics of the Human Hand*
- [6] Vladimir Zatsiorsky, (1998), *Kinematics of human motion*

COOPERATIVISMO BIOINSPIRADO BASADO EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS HORMIGAS

Kristel Solange Novoa Roldan
ksnovoar@udistrital.edu.co
Brayan Andrés Bermúdez Bucurú
babermudezb@correo.udistrital.edu.co
Miguel Ángel Valbuena Nuñez
mavalbuenan@correo.udistrital.edu.co

Universidad Distrital Francisco José De Caldas, Bogotá D.C, Colombia.

Resumen:

La recolección de comida por parte de las hormigas es una labor que requiere un trabajo cooperativo de todas las que conforman la colonia. Con base en esto, se emula el comportamiento de estas aplicado en la robótica cooperativa. Esto se logró a partir de la construcción de dos plataformas móviles capaces de tener este tipo de comportamiento de dos de las partes importantes de las colonias de hormigas. Estas dos plataformas se mueven en un entorno controlado y conocido para ellas; La plataforma uno “buscadora” es la encargada de rastrear todo el entorno controlado en busca de “alimento” y de transmitirle la posición exacta a la plataforma dos “recolectora” para que esta vaya directamente a recolectarlo. En este artículo se muestra el desarrollo de un sistema conformado por dos plataformas robóticas elaboradas con piezas del kit Lego y sensores, dando a conocer el trabajo autónomo entre ellas. Este proyecto se centra en una de las líneas de investigación del grupo en Robótica Móvil Autónoma – ROMA – de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica.

Palabras Clave: Comunicación inalámbrica, Plataforma, Sistema cooperativo, sistema sensorico.

1. INTRODUCCIÓN:

La recolección de comida por parte de las hormigas es un sistema eficaz y organizado que se ve todos los días en la naturaleza. Se emulo este tipo de trabajo cooperativo por medio de dos plataformas móviles, desarrolladas a partir de una tarjeta de desarrollo PSoC, sensores de reflectancia, módulos puente H, módulos step down. Implementando una comunicación inalámbrica Bluetooth entre ellas para los datos de posición. En un futuro se espera poder implementar este tipo de búsqueda como ayuda a los cuerpos de rescate en una zona colapsada. Estas dos plataformas se construyeron con piezas del kit de robótica LEGO® MINDSTORMS 2.0, con una estructura diseñada por medio de manuales y guías

para la construcción de diversas plataformas con este kit.

2. Metodología:

Se implementaron dos plataformas móviles en un entorno controlado y conocido, para el trabajo en equipo en la búsqueda y recolección de objetos.

En este proyecto un microcontrolador PSoC de 32 bits con un procesador ARM cortex el cual reemplaza el ladrillo inteligente del kit LEGO® MINDSTORMS 2.0, se implementó en las dos plataformas para lograr un buen control sobre estas. La plataforma uno, “Buscadora”, explora completamente el entorno controlado, cuando esta detecta un obstáculo “comida” mediante el sensor de contacto, se encarga de enviar los datos de posición (ejes coordenados) a través del módulo bluetooth a la plataforma dos, “Recolectora”, la cual se dirige directamente al punto coordenado, recoge la “comida” y se devuelve a su punto de inicio, quedando lista para cuando la plataforma uno “buscadora” le envíe nuevamente la información de más comida encontrada.

En la Figura [1] se observa el diagrama de bloques implementado en la plataforma uno “Buscadora”, donde se puede analizar que cuando el microcontrolador toma la lectura de los sensores este habilita los actuadores o la comunicación según la lectura tomada.



Figura [1]: Diagrama de bloques plataforma “Buscadora”.

La Figura [2] también muestra el diagrama de bloques implementado en la plataforma dos “Recolectora” y como esta hace todas sus labores a

partir de la lectura de los sensores por parte del microcontrolador, quien es el que habilita los actuadores.



Figura [2]: Diagrama de bloques plataforma recolectora.

2.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

2.1.1 Construcción de la estructura:

El montaje de las estructuras se realizó a partir de los manuales de LEGO de donde se obtienen los dos modelos óptimos para las estructuras, teniendo en cuenta que en ellas se ubican los sensores de contacto, los sensores de línea, los módulos puente H, módulos step down y comunicación inalámbrica, estos se pueden observar en la figura [3] y figura [5] donde se muestra la estructura de las dos plataformas describiendo cada una de sus partes. También se puede notar que la plataforma dos “recolectora” tiene una característica especial la cual es su brazo recolector (ver figura [5]) el cual se describirá más adelante. De aquí el primer resultado obtenido.

2.1.2 Fuente de Voltaje:

Con la plataforma se procedió a implementar los diferentes voltajes necesarios para alimentar todos los módulos y circuitos que están en el robot, llegando a la conclusión de que fueron necesarios tres voltajes diferentes.

La fuente principal es una batería de alta descarga con tecnología Ion Polímero Litio de tres celdas y un suministro de corriente de 1.5 A adecuada para este proyecto dado su calidad y capacidad.

A partir de aquí es necesario obtener los tres voltajes: 3.3V para toda la lógica y circuitos lógicos como los sensores de línea, sensores de contacto y módulos bluetooth. 9V necesarios para alimentar la tarjeta de desarrollo PSoC y un voltaje variable necesario para la alimentación de los drivers de los motores para calibrar la velocidad de avance de las plataformas.

Fueron necesarios tres módulos Step Down para cada plataforma (ver figura [3] y figura [5]) de las siguientes características: Es una fuente basada en el regulador LM2596, salida entre 1,5V y 35VDC y capacidad de corriente hasta de 3A, óptima para obtener los tres voltajes necesarios para el desarrollo de las plataformas.

2.2 RESULTADOS

2.2.1 Plataforma uno “Buscadora”

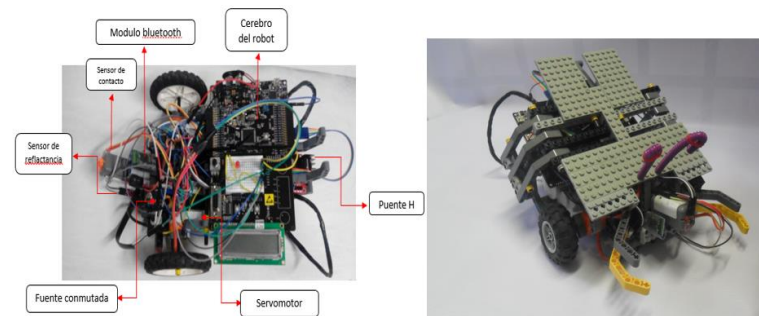


Figura [3]. Plataforma uno “Buscadora”

En la figura [3] se observa el primer resultado obtenido, el cual es la plataforma uno “buscadora” con cada una de sus partes y todos los módulos acoplados, se ven dos fotos debido a que después de ponerle la carcasa no se quedan visibles los módulos y por esto fue necesario tener dos imágenes una sin carcasa y una con carcasa para poder visualizar las partes de la plataforma. Para dar inicio a trabajar en la búsqueda de obstáculos “comida”, esta plataforma consta de tres sensores de reflectancia, tres módulos step down y a continuación en la tabla [1] se describe la composición general de esta.

La figura [4] describe la programación utilizada para el buen funcionamiento de la plataforma uno “buscadora”. Da inicio a recorrer el entorno, si encontró obstáculo recolecta los datos y los envía a la plataforma dos “recolectora”, luego del envío de datos y de saber que la plataforma dos “recolectora” está en su punto de inicio continua recorriendo el entorno hasta terminar el recorrido en caso de que no encuentre obstáculos sigue su recorrido hasta terminar de explorar el entorno.

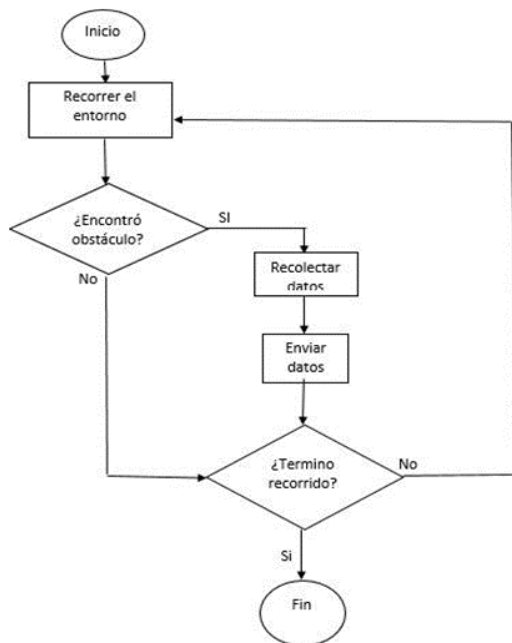


Figura [4]: diagrama de flujo del robot buscador de obstáculos

Plataforma uno “Buscadora”	
Peso	460g
Ancho	27 cm
Largo	35cm
Alto	23cm
Capacidad de giro	360°
Tracción	2 Ruedas
Servomotores	2 Tipo LEGO
Sensores de contacto	1 Tipo LEGO
Sensores de reflectancia	3 QRT1RC
Microcontrolador	PSoC 5 LP
Módulos puente H	1 L293D
Módulos Bluetooth	1 HC-05
Fuentes Conmutadas	3 LM2596
Voltaje de operación	12V
Consumo máximo de corriente	1.5 ^a

Tabla [1]. Características de la plataforma uno “buscadora”

2.2.2 Plataforma dos “Recolectora”

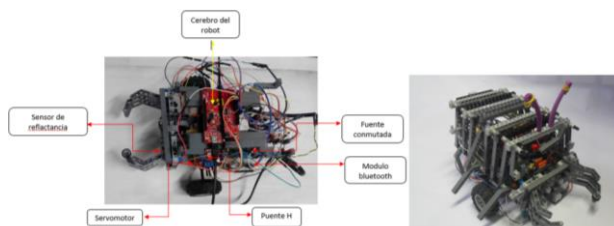


Figura [5]. Plataforma dos “Recolectora”.

En la figura [5] se puede observar la estructura resultante de la plataforma dos “recolectora”, estas dos fotos de la plataforma se hicieron con el fin de poder mostrar un poco algunas de sus partes ya que la plataforma resultante no nos deja notar los módulos que esta utiliza. La figura [5] nos muestra cada una de sus partes, su característica especial, la cual es la pinza que le permite recolectar los obstáculos “comida”, también se pueden notar las conexiones de todos los módulos y sensores que van directamente al microcontrolador. Esta plataforma consta de tres sensores de reflectancia, tres módulos step down y sus partes varias que a continuación en la tabla [2] se da una descripción de la composición general de la plataforma dos “recolectora”.

En la figura [6] se describe la programación utilizada en la plataforma dos “recolectora” para su buen funcionamiento, esta plataforma inicia en modo de espera hasta recibir los datos, si esta recibe los datos se dirige a recojer el obstaculo y cuando llega ahi simplemente lo recoje y se devuelve a su punto de inicio para esperar el recibimiento de más datos.

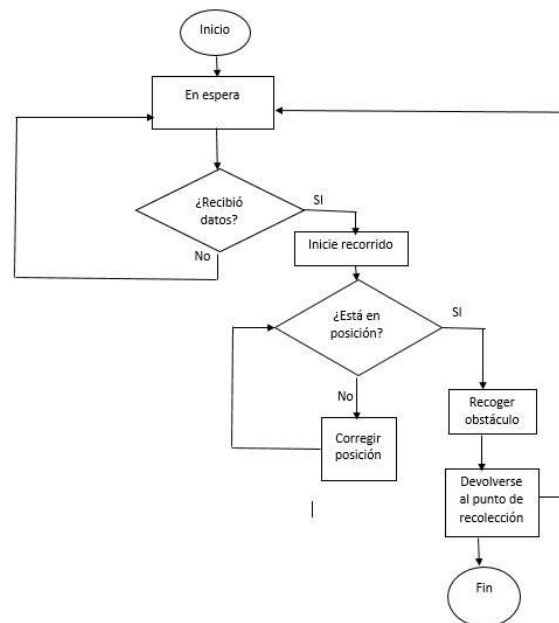


Figura [6]: diagrama de flujo del robot recolector de obstáculos.

Plataforma dos Buscadora	
Peso	490g
Ancho	27cm
Largo	25cm
Alto	19cm
Capacidad de giro	360°
Tracción	2 Ruedas
Sistema de recolección	Pinza mecánica
Distancia de apertura	12cm

máxima de la pinza	
Altura pinza recolectora	4cm
Servomotores	2 Tipo LEGO
Sensores de contacto	No
Sensores de reflectancia	3 QRT1RC
Microcontrolador	PSoC 4
Módulos puente H	2 L293D
Módulos Bluetooth	1 HC-05
Fuentes Conmutadas	3 LM2596
Voltaje de operación	12V
Consumo máximo de corriente	1.5 ^a

Tabla [2]. Características de la plataforma recolectora.

2.2.3 Entorno controlado:

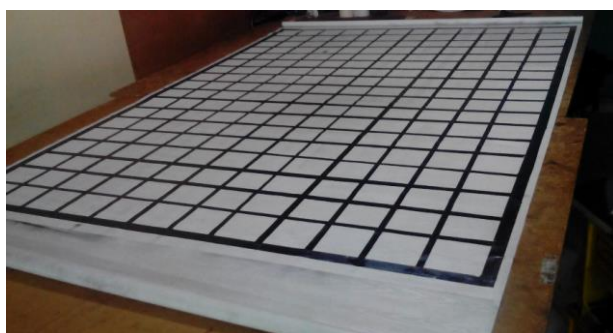


Figura [7]. Entorno Controlado.

El entorno controlado esta hecho matricialmente, en donde se ubican 18 columnas y doce filas, esto se puede ver en la figura [7], estas son las marcas de posición, dispuesto de esta manera para que el robot navegue por medio de cada marca de posición, estas líneas hechas en color negro ya que este color absorbe toda la luz y hace que el sensor de reflectancia no detecte reflejo de la luz incidente, esto con el fin de que las dos plataformas conozcan su posición en cualquier momento por medio de ejes coordenados. Todas las dimensiones del entorno controlado y su composición general se pueden ver en la Tabla [3].

Largo	2 m
Ancho	1.5 m
Cantidad de espacios a lo largo	18
Cantidad de espacios a lo ancho	12

Color predominante	Blanco
Color de las líneas	Negro
Grosor de las líneas	2 cm
Tamaño de los espacios	9 cm * 11cm

Tabla [3]. Características del entorno.

2.2.4 Sensor de contacto:

Teniendo ya los voltajes se procede a configurar el sensor de contacto el cual es obtenido del kit LEGO, este funciona como un pulsador de dos estados (ON/OFF), entonces se conecta a el voltaje lógico (3.3V) y a continuación a la tarjeta de desarrollo, de esta manera se observan los dos estados del pulsador como dos voltajes uno lógico y cero lógico.

2.2.5 Sensor de reflectancia (línea):

Los sensores de línea se usaron de dos maneras diferentes. Como el entorno controlado está diseñado matricialmente con sus líneas guías como se ve en la figura [5], es necesario que el robot pueda seguir las guías y hacer los giros correspondientes en donde la rutina de programación así lo indique, para esto se equipa cada robot con tres sensores de línea diferentes, dos ubicados al frente del robot dispuestos para seguir las líneas guías, y otro ubicado en un lado del robot dispuesto para detectar las marcas del entorno que significan el cambio de posición en la matriz entorno necesario para el reconocimiento de posición.

2.2.5 Módulo Bluetooth:

El modulo que se ve en Figura [8] proporciona la comunicación inalámbrica para el envío de los datos de posición, se ubicó un HC – 05 (Módulo) en un lugar aleatorio de la plataforma, este módulo convierte del protocolo RS232 a Bluetooth directamente, previo a esto es necesario configurar uno de los módulos como maestro y configurar el otro como esclavo, luego de esto al encenderlos los dos se vinculan automáticamente. Para hacer uso de estos módulos se implementa una comunicación serial común y corriente en la tarjeta de desarrollo, como los módulos ya están vinculados esto proporcionará el medio de transmisión para la comunicación serial.



Figura [8]. HC-05 Módulo Bluetooth.

2.2.6 Pinza recolectora:

La plataforma dos “recolectora” posee una pinza que se ve en la figura [9]. Esta pinza abre y cierra de una forma muy efectiva para poder recoger los obstáculos en el entorno sin ningún problema. La construcción se hizo partiendo de diseños ya hechos por LEGO para esta misma pinza.

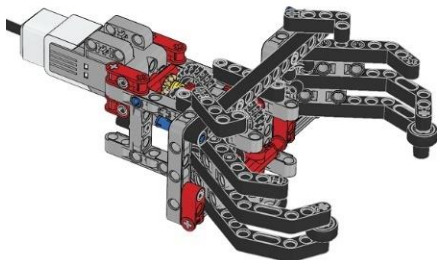


Figura [9]: servomotor para implementar el brazo robótico [3]

2.2.7 Obstáculo “Comida”:

El obstáculo que está en la Figura [10], es el objeto que reemplaza la “comida” en este proyecto, tuvo como diseño inicial un cubo que fue hecho a partir de piezas del kit lego mindstorms con las dimensiones necesarias para que la pinza del robot recolector fuera capaz de recogerla.

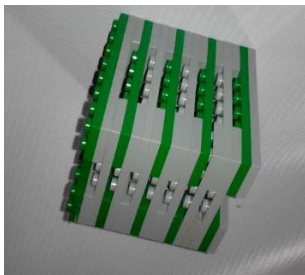


Figura [10]. Primer obstáculo implementado.

Este obstáculo generó errores debido a que su peso afectaba de manera considerable a la plataforma dos “recolectora” lo que hacía que los sensores de reflectancia quedaran sobre el piso anulando sus lecturas. Por esto y como medida final se optó por hacer este mismo diseño de obstáculo sobre Poliestireno expandido (icopor) figura [11], material que por su ligero peso no afectaba ninguna de las mediciones de los sensores de reflectancia. Quedando como diseño final de obstáculo.

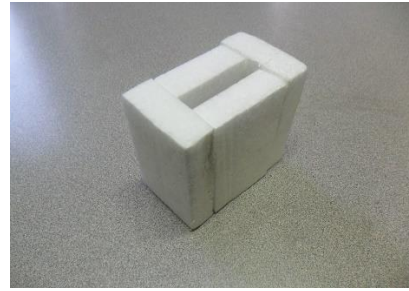


Figura [11]. Diseño de obstáculo final

2.2.8 Exploración plataforma uno “buscadora” y plataforma dos “recolectora”

El algoritmo implementado para la navegación en el entorno de la plataforma “buscadora” se describe a continuación.

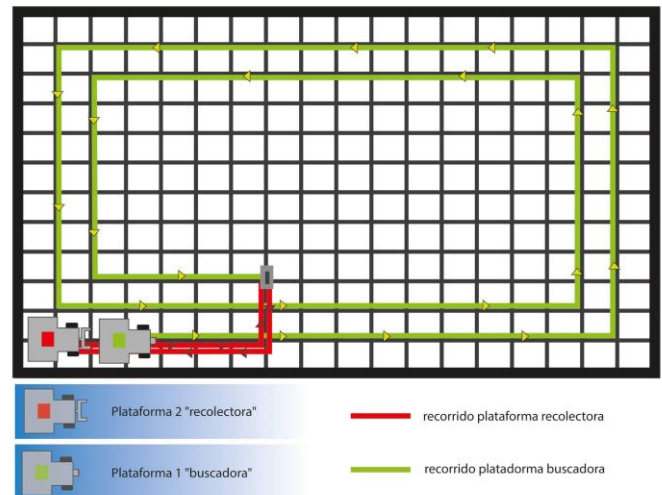


Figura [12]. Recorrido de las dos plataformas

Como se ve en la figura 12 la plataforma uno “recolectora” empieza a recorrer el entorno controlado y va llevando la cuenta de donde está, cuando llega al valor máximo de la coordenada X que es 17, gira 90 grados a la izquierda después cuenta el valor máximo de la coordenada Y que es 12 vuelve y gira 90 grados a la izquierda, antes de finalizar la primera vuelta le resta 1 a cada eje y con esto cada vez que da una vuelta este se va dirigiendo hacia el centro del entorno hasta llegar a la última coordenada y con esto se dice que ha recorrido todo el entorno. Al encontrar un obstáculo la plataforma uno “buscadora” envía los datos de posición a la plataforma dos “recolectora” y esta realiza un recorrido directamente al obstáculo, lo recoge y se devuelve por el mismo camino que avanzó mientras la plataforma uno “buscadora” espera, cuando la plataforma dos “recolectora” llega a su posición de inicio, suelta el obstáculo y avisa a la otra plataforma que ya puede continuar realizando el recorrido.

3. PRUEBAS

3.1 PRUEBA DE DISTANCIA DEL SENSOR DE REFLECTANCIA

Fue necesario ubicar los sensores de reflectancia a diferentes distancias las cuales están especificadas en la tabla [4], cuando se indica “sin respuesta” esto quiere decir que el sensor a enviando un cero lógico y cuando es “Respuesta positiva” es cuando el sensor a enviando un uno lógico. Estas lecturas las hace la tarjeta de desarrollo y con el uno lógico esta habilita el algoritmo para que el robot se pueda desplazar sobre la línea del entorno.

Distancia	Respuesta sensor
0 – 2 mm	Sin respuesta
3 – 6 mm	Respuesta positiva
> 6 mm	Sin respuesta

Tabla [4]. Respuesta del sensor de reflectancia frente a la distancia.

3.2 PRUEBA DE VELOCIDAD DE SERVOMOTORES

Cuando se comenzó a desplazar la plataforma buscadora en el entorno y se notó que la velocidad de desplazamiento de la plataforma afecto tanto el recorrido como la fidelidad de las mediciones de los sensores de reflectancia (sensores alimentados a 5v en todos los valores de voltaje suministrado a los servomotores) se empezó a utilizar diferentes voltajes para ir notando los cambios en el desplazamiento de la plataforma buscadora. Se puede notar que en la tabla [3] se plantean cuatro valores de voltajes diferentes; cuando se conectan los servomotores a 3.3v la velocidad del desplazamiento es 25% de su velocidad máxima, pero la medición por parte de los sensores es un 100% debido a que si la plataforma se desplaza a esa velocidad el sensor podrá contar mucho mejor.

Cuando se conectan los servomotores a 6 voltios estos aumentan su velocidad de desplazamiento a 45% de su velocidad máxima y la medición de los sensores se ve afectada en un 20% debido a que si la plataforma va más rápido menos tiempo tiene el sensor para generar mediciones.

Al conectar el motor a 9v el aumento en su velocidad es de 70% de su velocidad máxima y a esta velocidad ya los sensores se ven afectados en un 65% al momento de tomar mediciones. Ya el último valor de voltaje fue de 12v y en este punto el motor alcanza su máxima velocidad afectando en un 98% la medición de los sensores.

Voltaje	Velocidad	Calidad de las mediciones
3.3V	Baja	La mejor
6V	Media	Buena
9V	Alta	Regular
12	Máxima	Mala

Tabla [5]. Fidelidad de las mediciones con respecto a la velocidad del robot.

3.2 PRUEBA DE TRANSMISIÓN DE DATOS Y CORRECCIÓN DE ERRORES

En la figura [13] se observa la plataforma dos “recolectora” dirigirse al obstáculo según los datos recibidos por la plataforma uno “buscadora”, en esta prueba se observó que la plataforma dos “recolectora” iba un eje coordenado con un error de más uno de donde se encontraba el obstáculo, para esto se hizo la prueba de funcionamiento del proyecto completo, en donde se colocó un obstáculo y se observó que al momento que la plataforma uno “buscadora” le enviaba datos a la plataforma dos “recolectora”, esta se los enviaba con un margen de error de un eje coordenado de mas, lo que hacía que la plataforma dos “recolectora” avanzara un eje de más en el entorno y esta no lograra llegar al obstáculo.



Figura [13]. Error en los datos.

Se llega a la conclusión que este error está dado por la posición del sensor contador de marca presente en el robot buscador y también se logra deducir que el error tiene un patrón, este patrón viene dado por el recorrido que lleva la plataforma buscadora y en conclusión se llega a la siguiente tabla, en donde se relaciona el error con el sentido del recorrido que

lleva la plataforma buscadora al encontrar el obstáculo.

Sentido del recorrido encontrar obstáculo	del al el	Corrección de error
Recorrido en X negativos.	X	Sumar una unidad a la coordenada X. Coordenada Y sin cambios.
Recorrido en Y negativos	Y	Coordenada X sin cambios. Coordenada Y sin cambios.
Recorrido en X positivos	X	Restar una unidad a la coordenada X.
Recorrido en Y positivos	Y	Restar una unidad a la coordenada Y.

Tabla [7]. Corrección de errores de recolección.

Una vez hechos estos ajustes luego de recibir los datos se observa que la plataforma recolectora recoge correctamente el obstáculo puesto en el entorno.

4. CONCLUSIONES

- Al diseñar una estructura provisional de la plataforma se tuvo la experiencia que para que el desplazamiento de la plataforma fuera en línea recta se tenía que trabajar con un centro de gravedad en la estructura (distribución balanceada de la estructura) y para esto se procedió a hacer el acople del brazo robótico a la estructura; el cual le permitió al robot recoger los obstáculos encontrados en el entorno controlado. También nos encontramos que el diseño de la estructura tenía que ser resistente debido al tamaño de la tarjeta de desarrollo (cerebro del robot) y los diversos módulos que le permitieron el total funcionamiento al robot.
- Después de haber colocado la tarjeta de desarrollo, los módulos y configurado los sensores de reflectancia para que el desplazamiento de la plataforma por el entorno fuera conocido y controlado por ella misma. Se procedió a iniciar el desplazamiento de esta por el entorno y el resultado fue que el primer diseño del entorno no era el más óptimo para ser conocido y controlado por las plataformas. Por ende el entorno quedo como se muestra en la figura [7].
- Al colocar varios obstáculos en el entorno la plataforma buscadora envía los datos

correctamente y se da el trabajo cooperativo entre estas dos para finalmente recolectar los obstáculos necesarios.

- En caso de los sensores de reflectancia de las dos plataformas, fue necesario calibrar la distancia a la cual se encuentran del entorno ya que si queda muy cerca o muy lejos estos no eran capaces de sensar correctamente.
- Para la correcta medición de las líneas de marca en la cuadrícula del entorno es necesario que este esté completamente limpio y sin impurezas ya que estas ocasionan error en las lecturas.
- La navegación de la plataforma buscadora se realiza de una manera en círculos (caracol), se hizo de esta manera para que recorriera completamente el entorno haciendo giros de 90° a la izquierda esto con el fin de que la plataforma tenga un mayor campo de acción frente a los obstáculos.
- El entorno es completamente cuadrículado para hacer que los robots sigan una ruta y a la vez proporcionarles la capacidad de saber en qué punto exacto de este están, esto con el propósito de ubicar los obstáculos en cualquier intersección de todo el entorno.
- En cuanto a la comunicación se implementó una red punto a punto en donde la plataforma buscadora, luego de haber detectado el objeto y de hacer los cálculos correspondientes para saber en qué punto exacto de la cuadrícula se encuentra, envía dos datos a la plataforma recolectora, datos correspondientes a la coordenada en el eje X y a la coordenada en el eje Y.

Agradecimientos

Al grupo de investigación en Robótica Móvil Autónoma (ROMA), a la Ing. Kristel Novoa Roldan; por su apoyo, asesoría y constante colaboración durante todo el desarrollo del proyecto.

Referencias

- [1] Electronilab.co, "LM2596." [Online]. Available: http://electronilab.co/wpcontent/uploads/2014/05/Lm2596_Electronilab_1.jpg

[2] Electronilab.co, “L298N” [Online]. Available: <http://electronilab.co/tutoriales/tutorial-de-uso-driver-dual-l298n-para-motores-dc-y-paso-a-paso-con-arduino/>

[3] LEGO, “LEGO.” [Online]. Available: <http://www.lego.com/es-es/mindstorms/downloads/building-instructions/gripp3r/>

[4] Cypress, “PSoC® 5LP.” [Online]. Available: <http://www.cypress.com/psoc5lp/?source=CY-ENG-HEADER>.

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE UN EXOESQUELETO DE MIEMBRO SUPERIOR PARA SOPORTE DE CARGAS

Blanco, A., Díez J.A., López, D., Badesa, F.J., García-Aracil, N.
Universidad Miguel Hernández de Elche, ablanco@umh.es

Ignacio Sánchez, M.
Movilfrio S.L.

Resumen

El presente artículo describe el proceso de diseño de un exoesqueleto de miembro superior dentro del marco del proyecto ExIF, el cual tiene como objetivo dar soporte al operador en tareas de instalación y mantenimiento de instalaciones. Además, se pretende estudiar las características técnicas que deberán cumplir los motores que se seleccionen para accionar dicho dispositivo, con el objetivo de que se cumplan con las especificaciones técnicas y requerimientos de las tareas objetivo seleccionadas.

Palabras Clave: Exoesqueleto, miembro superior, diseño, actuadores, TME.

1 INTRODUCCIÓN

Los trastornos músculo esqueléticos (TME) son un conjunto de lesiones inflamatorias o degenerativas de músculos, tendones, ligamentos, etc., de más o menos gravedad, que abarcan desde incomodidad, molestias o dolores, hasta cuadros médicos más graves que obligan a solicitar la baja laboral e incluso a recibir tratamiento médico.

Una parte de estos TME se encuentran registrados como accidentes causados por sobreesfuerzos, por la realización de movimientos repetitivos o por someter al cuerpo a posturas forzadas o mantenidas.

En España [1], en su conjunto, los TME se sitúan entre las primeras tres causas de baja laboral en la última década, y se ha situado en el primer puesto en cuanto a la duración media de los procesos por incapacidad laboral temporal. Esta situación implica un fuerte impacto económico, social y laboral para las personas que padecen este tipo de trastornos.

El proyecto ExIF (Exoesqueleto Robótico Inteligente y Sistemas Avanzados de Interface Hombre Máquina para tareas de mantenimiento en las Industrias del Futuro), surge de la necesidad de eliminar o reducir los trastornos músculo esqueléticos causados por el

movimiento manual de cargas pesadas, las malas posturas y la repetición de movimientos asociados a los trabajos de instalación y mantenimiento de instalaciones industriales.

Este proyecto propone el desarrollo de un exoesqueleto robótico de miembro superior que será soportado por una estructura de tipo exoesqueleto para los miembros inferiores con el fin amplificar la fuerza propia del usuario, permitiendo la fácil y eficiente manipulación de cargas y evitando los movimientos repetitivos y la adopción de posturas fatigantes o dolorosas durante la realización de trabajos de mantenimiento industrial. El proyecto propone también el desarrollo de un sistema avanzado de interface hombre-máquina basado en técnicas de Realidad Aumentada enlazado con un sistema informático de mantenimiento integral. El interface hombre-máquina dispondrá de capacidades cognitivas que le permitan ser proactivo en función del análisis del contexto y del entorno.

En el presente artículo se abordará concretamente el diseño de un primer prototipo de exoesqueleto de miembro superior, así como se pretende dar una idea de la selección de motores necesarios para que dicho exoesqueleto cumpla las funciones especificadas en las bases del proyecto.

2 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DEL DISPOSITIVO

2.1 MOVIMIENTOS DEL MIEMBRO SUPERIOR DEL SER HUMANO

Antes de abordar el diseño del exoesqueleto, resulta necesario conocer los movimientos propios de la zona del cuerpo a la que se pretende dar soporte, el miembro superior.

El miembro superior del cuerpo humano engloba desde la mano hasta el hombro. Sin contar con los movimientos propios de la mano, que no se incluye dentro del proyecto, el miembro superior cuenta con 7 grados de libertad:

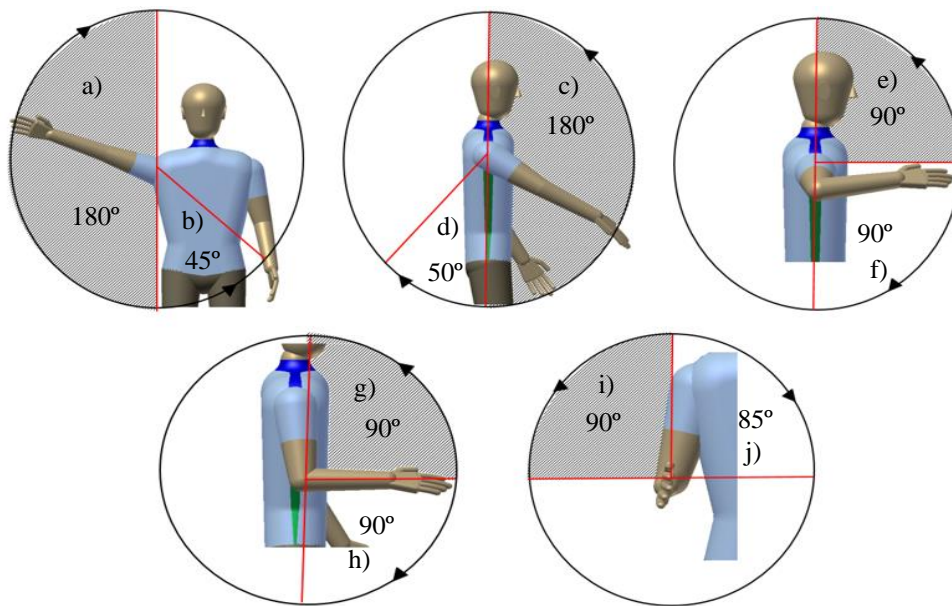


Figura 1: Rangos máximos de movimientos en el miembro superior, donde: a) abducción, b) aducción, c) flexión del hombro, d) extensión del hombro, e) rotación externa, f) rotación interna, g) flexión codo, h) extensión codo, i) supinación y j) pronosupinación

- Abducción/aducción del hombro
- Flexión/extensión del brazo
- Rotación externa/interna del hombro
- Flexión/extensión del codo
- Pronación/supinación de la muñeca
- Flexión/extensión de la muñeca
- Desviación cubital/radial de la muñeca

Para el caso que se describe en el presente artículo no se tendrán en cuenta la flexión/extensión de la muñeca ni la desviación cubital/radial, movimientos que se añadirán al exoesqueleto en prototipos futuros en caso de ser necesario.

Los rangos máximos de cada uno de estos movimientos se han definido en base a la información recopilada en [2], mostrados en la Figura 1. Sobredimensionando el diseño del mecanismo a estos rangos máximos nos posicionaremos del lado de la seguridad, puesto que el operario no llegará en ningún caso a estos límites mecánicos al realizar las tareas propias de su puesto de trabajo.

2.2 DISEÑO CONCEPUAL

En primer lugar, se ha realizado un primer diseño de concepto donde el mecanismo es capaz de seguir las trayectorias realizadas por el operador mediante articulaciones pasivas, como puede observarse en la Figura 2.

Este dispositivo se ha diseñado de forma que pueda adaptarse a distintas dimensiones de brazo, por lo que

un mismo exoesqueleto puede ser empleado por distintos usuarios, sin importar su complejión.

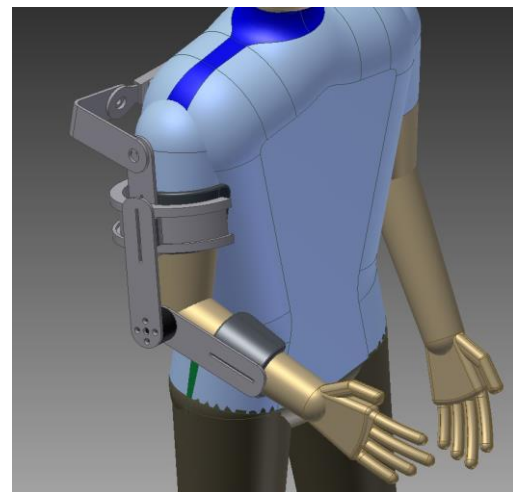


Figura 2: Diseño inicial del exoesqueleto de miembro superior

Las dimensiones antropométricas que se han tomado como referencia para el diseño del mecanismo están recogidas en el artículo de Antonio Carmona Benjumea [3].

Con este objetivo de adaptabilidad, tal y como puede observarse en la Figura 3, se han utilizado ranuras en los eslabones que componen el sistema robótico de manera que sea posible alinear los ejes de rotación de los motores con las articulaciones del brazo del usuario.

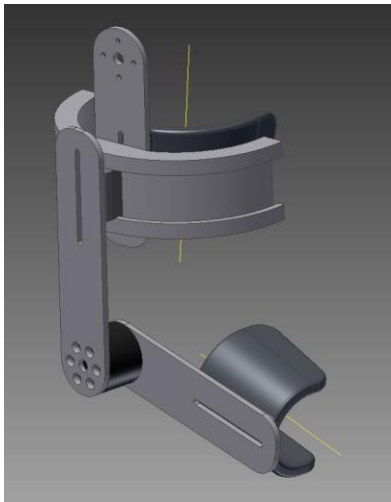


Figura 3: Placas con ranura para aportar adaptabilidad

Por otro lado, se han colocado dos deslizaderas lineales comerciales en la zona de la espalda con el fin de facilitar la colocación del exoesqueleto sobre el operario, y permitir hacer coincidir el eje de giro del hombro del trabajador con el eje de giro del exoesqueleto. Además, como se muestra en la Figura 4, cada una de estas guías está provista de un freno para hacer cómoda la manipulación y el transporte del dispositivo.

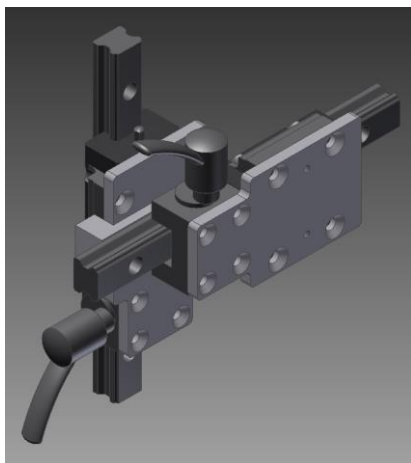


Figura 4: Guías lineales para ajustar la posición del hombro

Como se ha comentado brevemente en la introducción, este exoesqueleto de miembro superior será soportado por una estructura para los miembros inferiores de tipo exoesqueleto, que transmitirá el peso del exoesqueleto superior y las cargas/herramientas portadas por el operario directamente al suelo. Puesto que esa estructura se encuentra en una fase de desarrollo inicial, de forma provisional se ha previsto que las guías lineales vayan ancladas a una placa que irá en la zona de la

espalda como si se tratara de una mochila. En la Figura 5 se puede observar esta solución provisional, así como el anclaje de las guías con las placas que permiten los movimientos del hombro.

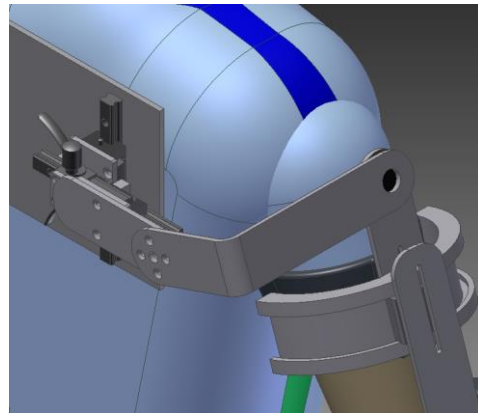


Figura 5: Anclaje de las guías lineales con el exoesqueleto

Con la solución presentada, el sistema cuenta con 4 grados de libertad, 3 correspondientes a los movimientos del hombro comentados en el apartado anterior, y un último correspondiente a la flexión/extensión del codo. Obsérvese que para el movimiento de rotación interna/externa del hombro se ha provisto al mecanismo de una deslizadera circular. La parte fija de dicha guía se encuentra anclada a la zona del brazo, mientras que la parte móvil se fija a la órtesis del antebrazo, permitiendo así realizar el movimiento deseado.

Para aumentar dichos grados de libertad, se le ha acoplado un mecanismo de pronosupinación realizado por el grupo nBio dentro del marco del proyecto europeo AIDE [4]. La versión actual de este mecanismo de pronosupinación se presenta en la Figura 6.

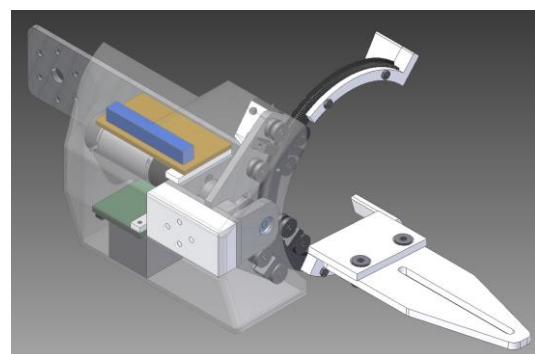


Figura 6: Mecanismo de pronosupinación de la muñeca

Resulta interesante hacer hincapié en el desacoplamiento de las articulaciones, lo que permite

mover cada articulación con independencia de las demás. De esta forma, el control del movimiento del exoesqueleto será más exacto. Además, esta configuración permite bloquear alguna articulación si se desea.

Por todo ello se ha conseguido un exoesqueleto capaz de seguir las trayectorias producidas por los movimientos naturales del brazo que se enumeran en el apartado anterior.

2.3 SELECCIÓN DE MOTORES

Puesto que el exoesqueleto está pensado para ayudar al operario en tareas de instalación y mantenimiento de instalaciones industriales, no será suficiente con que el mecanismo sea capaz de seguir los movimientos del trabajador, sino que deberá soportar parte de la carga con la que se trabaja. Es por ello por lo que será necesario que el dispositivo cuente con unos accionamientos determinados de tipo motor-reductor que cumplan unas características y requerimientos específicos.

Para la selección de dichos actuadores es necesario saber el par de fuerzas al que van a estar sometidas cada una de las articulaciones.

En primer lugar, importaremos el ensamblaje del exoesqueleto incorporado al usuario que se ha modelado en Inventor al programa Anybody, software que permite realizar la simulación de la mecánica del cuerpo. Este programa resulta muy útil para estudiar cómo se comportará el cuerpo humano ante diversas situaciones, lo que nos permite conocer los esfuerzos soportados por las articulaciones al realizar diversas tareas.

Con este fin, se ha llevado a cabo la grabación de una serie de trayectorias del miembro superior de un usuario durante la realización de movimientos típicos de las actividades propias del entorno de trabajo al que está destinado el mecanismo objeto del presente artículo, como puede ser la manipulación de herramientas de montaje o herramientas de corte. De esta manera, se ha intentado simular de la manera más fielmente posible los esfuerzos articulares necesarios para llevar a cabo este tipo de actividad.

La grabación de estas trayectorias se ha realizado mediante el uso de la cámara V120:Trio de Optitrack, que se trata de un sistema de cámaras de tracking de tecnología infrarroja de muy alta precisión. Permite realizar el seguimiento en tres dimensiones, tanto en posición como en orientación, de trackers fijos formados por reflectores infrarrojos esféricos. Para grabar el movimiento realizado por el miembro superior se ha empleado un traje especialmente diseñado para adherir este tipo de trackers

reconocibles por el sistema de cámaras, al cual se le han colocado los trackers de forma estratégica en base a los puntos de reconstrucción cinemática que hay definidos en Anybody, como se muestra en la Figura 7.

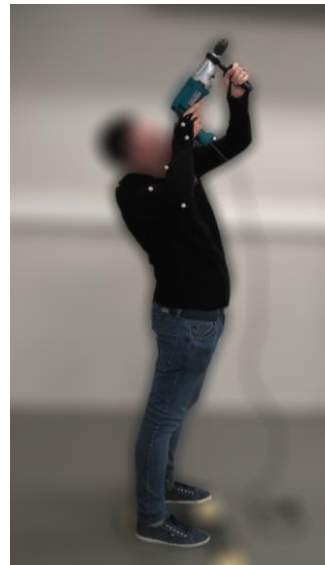


Figura 7: Grabación de trayectorias simulando la tarea a realizar por el operario

En la Figura 8 se muestra una captura de la simulación realizada en Anybody al insertar la trayectoria grabada.

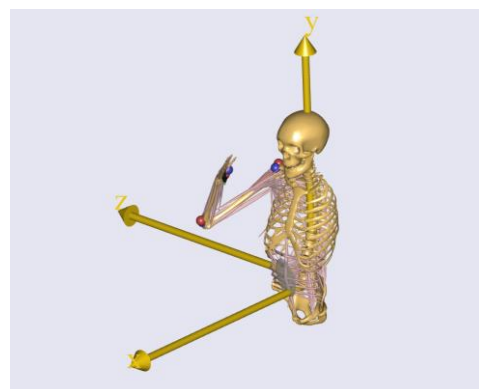


Figura 8: Captura de imagen de la trayectoria grabada

Las trayectorias grabadas nos permiten definir cuál es el movimiento natural que describe el brazo cargando un determinado peso y a una velocidad determinada. De esta manera, podemos utilizar esta información para calcular los esfuerzos que son necesarios en las articulaciones del dispositivo mecánico para llevar a cabo las trayectorias grabadas, pudiendo estimar así cuál es el par que debe realizar cada actuador para compensar la carga que debería soportar el trabajador sin la ayuda del exoesqueleto. En las Figura 9 y 10

podemos ver, respectivamente, los pares y la potencia necesaria en cada articulación para realizar la tarea deseada con éxito. En este caso, como se muestra en la Figura 7, la tarea consiste en levantar un taladro de 3 kg, donde la mano derecha soporta 2 kg y la mano izquierda el kilo restante, actuando ésta como soporte de la primera. La duración de la tarea es de 2 segundos.

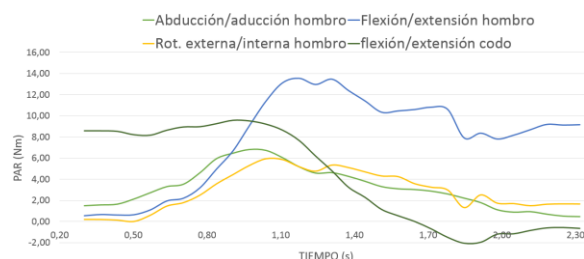


Figura 9: Pares necesarios en cada articulación al realizar la tarea

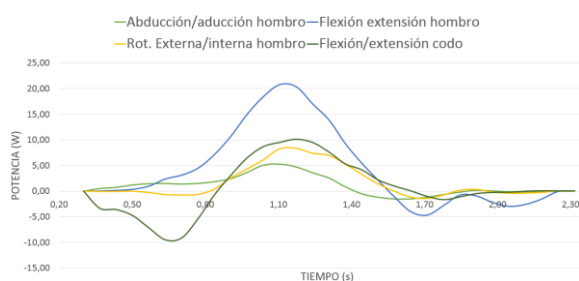


Figura 10: Potencia necesaria en cada articulación para realizar la tarea

Según las gráficas anteriores, podemos determinar el par máximo realizado por cada articulación, así como la potencia máxima necesaria. Estos datos quedan recogidos en las tablas 1 y 2, respectivamente.

Tabla 1: Par máximo esperado para cada sistema de actuación.

Movimiento	Par máximo (Nm)
Abducción/aducción hombro	7
Flexión/extensión hombro	14
Rot. Externa/interna hombro	6
Flexión/extensión codo	10

Tabla 2: Potencia máxima necesaria para cada sistema de actuación.

Movimiento	Potencia máx. (Nm)
Abducción/aducción hombro	6
Flexión/extensión hombro	21
Rot. Externa/interna hombro	9
Flexión/extensión codo	11

Puesto que el mecanismo de pronosupinación escogido ya tiene un motor que cumple con las especificaciones requeridas, no es necesario calcular de nuevo los esfuerzos en la zona de la muñeca.

Estos valores corresponden al esfuerzo del operario al realizar la tarea sin el exoesqueleto. Será necesario, por tanto, recalcular dichos valores cuando el trabajador realiza la tarea con el exoesqueleto, puesto que el peso, tanto de la estructura como de los motores, influyen a la hora de calcular los esfuerzos.

Para estar del lado de la seguridad, se han triplicado los valores anteriores, asumiendo que, en ningún caso, el exoesqueleto excederá un peso semejante. Es necesario calcularlo de forma aproximada puesto que, actualmente, se desconoce el diseño final y los materiales del sistema robótico, por lo que se sobredimensionan estos valores, mostrados en las tablas 3 y 4.

Tabla 3: Par máximo esperado para cada sistema de actuación, incluyendo el peso estimado del exoesqueleto.

Movimiento	Par máximo (Nm)
Abducción/aducción hombro	21
Flexión/extensión hombro	42
Rot. Externa/interna hombro	18
Flexión/extensión codo	30

Tabla 4: Potencia máxima necesaria para cada sistema de actuación, incluyendo el peso estimado del exoesqueleto.

Movimiento	Potencia máx. (Nm)
Abducción/aducción hombro	18
Flexión/extensión hombro	63
Rot. Externa/interna hombro	27
Flexión/extensión codo	33

Con estos valores, el paso siguiente será buscar aquellos actuadores (motor + reductor) que cumplan dichas características, intentando en la medida de lo posible reducir peso y tamaño, para evitar así posibles colisiones y facilitar la manipulación del dispositivo.

3 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El presente artículo introduce y describe el proceso de diseño de un exoesqueleto de miembro superior de 5-GDL que pretende dar soporte al operario durante la realización de trabajos de mantenimiento industrial.

Actualmente, el desarrollo del exoesqueleto se encuentra en una fase inicial, en la que se tiene un primer prototipo pasivo capaz de seguir las trayectorias realizadas por el usuario, así como una primera idea de las características técnicas que deberán cumplir los motores para actuar dicho sistema robótico.

El siguiente paso a seguir será estudiar un nuevo diseño donde el dispositivo lleve incorporados los actuadores escogidos previamente, además de avanzar en el anclaje del mecanismo al cuerpo del operario.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido en parte financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto DPI2015-70415-C2-2-R; y por Conselleria d'Educació, Investigació, Cultura i Esport de la Generalitat Valenciana, a través de la beca ACIF código 2016/216.

Referencias

- [1] Araña-Suárez, M., & Patten, S. B. (2011). Trastornos Musculo-Esqueléticos, Psicopatología y Dolor. *Trastornos Musculo-esqueléticos Psicopatología*, 1.
- [2] Norkin, C. C., & White, D. J. (2016). *Measurement of joint motion: a guide to goniometry*. FA Davis.
- [3] Benjumea, A. C. (2001) Datos antropométricos de la población laboral española, *Prevención, trabajo y salud: Revista del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo*, 14, 22-30.
- [4] Díez, J. A., Blanco, A., Catalán, J. M., Badesa, F. J., Sabater, J. M., & Garcia-Aracil, N. (2017) Design of a Prono-Supination Mechanism for Activities of Daily Living, *Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation II* (pp. 531-535). Springer International Publishing.

Estructura de control en ROS y modos de marcha basados en máquinas de estados de un robot hexápodo

Raúl Cebolla Arroyo
raul.cebolla.arroyo@alumnos.upm.es

Jorge De León Rivas, Antonio Barrientos
CAR UPM-CSIC, jorge.deleon, antonio.barrientos@upm.es

Resumen

Los sistemas de control en ROS basados en el paquete `ros_control` requieren la coordinación y publicación de cantidades ingentes de información. En los siguientes apartados se describe la estructura y herramientas que simplifican el control al uso de funciones simples en C++. Estas se recogen como métodos de una clase que simboliza el actuador de un robot hexápodo de exploración. Los modos de marcha de este robot, se planifican mediante máquinas de estados que simplifican su planteamiento y aumentan la capacidad de respuesta ante un fallo.

Palabras clave: ROS, interfaz, máquinas de estado.

1. Introducción

El robot hexápodo que es tratado en este caso es una versión del RHex desarrollado por el grupo de Robotica y Cibernetica de la Universidad Politecnica de Madrid [6] [8] [10], este robot fue concebido por proyectos de diversas universidades estadounidenses [6] como robot de búsqueda y rescate [7]. La particularidad de este robot reside en la forma en C de sus patas, posee tres de estas patas por cada lado articuladas a una base.

La configuración del robot le dota de una capacidad única para adoptar multitud de diferentes modos de marcha [4] [9] [5]. Esto hace que el control de cada una de las patas que lo componen sea lo más preciso posible. De igual forma se necesita que el modo de controlarlo sea de fácil accesibilidad al encargado de programar los diferentes modos de marcha.

El sistema de control del robot se ha desarrollado sobre ROS haciendo uso del paquete `ros_control`. Este tipo de sistemas de control generan multitud de diferentes mensajes y servicios sobre los que hay que actuar, causando que ejecutar una acción simple se vuelva ciertamente caótico.

Teniendo esta última idea en mente, se ha desarrollado un paquete de ROS capaz de simplificar el tráfico de información a manejar. El paquete permite que el control del robot pueda hacerse mediante llamadas a métodos de una clase que simbolice cada una de las patas en C.



Figura 1: Robot RHex. Fuente: [3]

Esta simplificación resulta fundamental a la hora de programar los modos de marcha. Estos se implementan mediante máquinas de estado. Siguiendo este método, se mejora la legibilidad y planteamiento de las diferentes marchas, de la misma forma se mejora la flexibilidad de las mismas ya que sólo se tiene que incluir un nuevo estado y modificar las transiciones pertinentes. Con esto se obtiene que el modo de marcha pueda implementar respuestas ante fallo de distinto tipo y paradas de emergencia.

La flexibilidad que aportan las máquinas de estado hace que sea idóneo para un robot cuyos modos de marcha son muy diferentes entre sí y que cada día aparecen nuevos para el mismo robot.

En el estudio del estado del arte no se han encontrado robots cuyos modos de marchas se implementen mediante máquinas de estado. Por tanto, este trabajo supone una incursión en una nueva idea que puede llevar a nuevas percepciones sobre cómo se implementan modos de marcha.

2. Descripción del robot

El robot sobre el que vamos a desarrollar el trabajo pertenece al robciib. Robot Hexápodo desarrollado por el grupo de Robotica y Cibernética de la Universidad Politécnica de Madrid [6] [8] cuya configuración y especificaciones se orientan hacia tareas de búsqueda y rescate.

La principal característica del RHex son sus patas en C. Sus seis patas se disponen de forma simétrica respecto a la dirección de avance normal del robot. Estas patas disponen de cierta flexibilidad [8][2], de esta forma el robot puede aprovechar el efecto de ballesta que crean para avanzar a mayor velocidad o incluso realizar saltos.

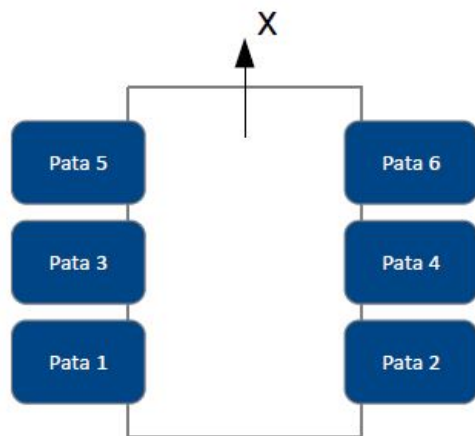


Figura 2: Numeración de las patas.

Para planteamientos futuros, se tomará la numeración de las patas que se expone en la figura 2 como convenio.

Con estas características, el hexápodo puede adaptar multitud de diferentes modos de marcha. El robot puede desempeñar desde pequeños saltos, subir y bajar escaleras [4] [1], avanzar de forma cuadrúpeda o incluso bípeda [5].

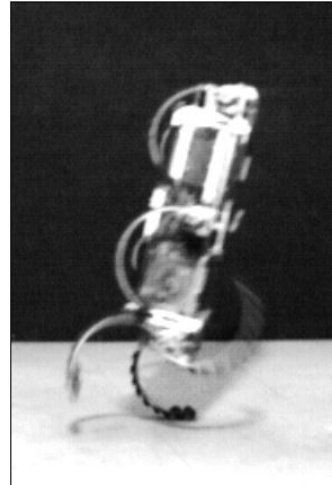


Figura 3: Marcha bípeda del RHex. Fuente: [5].

Se demuestra de forma indudable la versatilidad del robot en cuestión, los diferentes modos de marcha no es sino una prueba fehaciente de ello. Aún quedan por desarrollarse marchas que ni se han planteado, por eso es crucial que en un modelo de investigación se pueda acceder a la programación de las mismas de una manera sencilla y sobre todo, sin necesidad de poseer conocimientos sobre la arquitectura de control a bajo nivel.

La capacidad para superar terrenos accidentados del robot es difícilmente alcanzable por otros, esto lo hace idóneo para trabajos de búsqueda y rescate. Por tanto, es de esperar que el robot se encuentre con situaciones no previstas en su programación. Se necesita de un recurso que haga del robot, un sistema robusto ante este tipo de fallos. Este se encuentra en las máquinas de estado.

Una máquina de estado no es más que un planteamiento dónde el robot realiza transiciones entre estados, en cada estado el robot se comanda de una manera distinta, por ejemplo patas 1, 4, 5 a fase aérea mientras que el resto realizan la fase terrestre.

Al programar una máquina de estados se puede establecer una ruta de transiciones que per-

mitan al robot reaccionar ante imprevistos, de tal forma que nunca se encuentre bloqueado. Además, resulta sencillo reprogramar los diferentes modos de marcha, ya que esta metodología es muy flexible a la hora de incluir un nuevo estado.

3. Estructura de control

El sistema de control se ha planteado sobre el sistema operativo de robots más extendido, ROS, por tanto, para entender cómo se ha simplificado el comando de cada una de las patas, es necesario saber la estructura de control que se ha planteado sobre el robot.

El sistema de control se ha basado sobre el paquete *ros_control*. Este paquete estructura el sistema de control mediante dos elementos: las interfaces de hardware y los controladores.

Las interfaces de hardware sirven como conexión a ROS de los elementos reales, bien sean sensores o actuadores, mediante estos se conoce dónde se posiciona en memoria la información de los sensores y se puede ejercer sobre los actuadores.

Por otro lado, los controladores asumen las mismas funciones y tareas que un regulador o controlador de la teoría de control. En este caso, los controladores de *ros_control* son de tipo PID.

Teniendo en cuenta las características del robot, es de especial interés que en cualquier momento durante la ejecución de un modo de marcha se pueda cambiar de control de posición a control de velocidad en tiempo real. *Ros_control* permite cambiar de tipo de controlador mediante un agente que recibe el nombre de *controller_manager*, este permite cargar, eliminar o cambiar controladores en tiempo real, más adelante se estudiará cuáles son los servicios y mensajes a los que se debe acudir.

Es crucial saber que sobre un solo actuador, se puede tener activo un único controlador. Sin embargo, puede tener más controladores pausados que no actúen sobre él.

En base a lo establecido en estos últimos párrafos, cada una de las patas tendrá asociados dos controladores:

- Controlador de posición

- Controlador de velocidad

Que, respectivamente, recibirán el nombre de:

- *pata_position_controller*
- *pata_velocity_controller*

Los tipos de controladores que incluye *ros_control* por defecto son suficientes para las necesidades del robot por lo que no se necesita crear uno nuevo. De estos controladores se tomarán los que se basan en el esfuerzo, *effort_controller*, y dentro de estos de posición, *JointPositionController*, y de velocidad, *JointVelocityController*.

Para inicializar cada uno de los controladores es necesario una serie de parámetros, estos parámetros, tanto para el controlador de posición como el de velocidad son:

- El nombre de la unión que está controlada.
- Los valores de las constantes proporcional (P), derivativa (D) e integral (I).

Los valores de cada una de las constantes han sido ajustados mediante métodos eurísticos. Observando el comportamiento de las patas con distintos valores se ha determinado lo siguiente:

- Con acción proporcional el intervalo de establecimiento es menor de 1 segundo en el aire, suficiente para los requisitos del robot, por tanto no requiere de acción derivativa para alcanzar las especificaciones dinámicas.
- La acción derivativa, hace aumentar mucho la sobreoscilación, descartándose totalmente su uso.
- Se ha añadido una acción integral mínima para asegurar que el sistema sea robusto ante perturbaciones de bloqueo. Especialmente útil cuando la pata necesita alzar el robot desde el suelo.

Siguiendo estas conclusiones y mediante procedimientos eurísticos, los valores de cada una de las constantes en ambos casos es el siguiente:

$$Parametros\ PID \begin{cases} P &= 10 \\ I &= 0,2 \\ D &= 0 \end{cases} \quad (1)$$

Estos parámetros deben ser cargados en el servidor de parámetros de ROS. Para poder inicializar los controladores se puede hacer una llamada al nodo `/controller_spawner` pasando como argumento el nombre de los controladores a cargar.

Para conocer el estado¹ de los actuadores se puede incluir otro controlador, el `/jointStateController`, también estándar de `ros_control` que emite el mensaje de topic `/rob-cib_hexapod/joint_state` con el estado de las patas. Esto será necesario para la planificación de modos de marcha en ocasiones donde, por ejemplo, la condición de la transición sea el paso por una posición concreta.

Una vez que se ha desarrollado cómo se estructuran los controladores y que el robot puede ser actuado, necesitamos saber cómo realizar ese comandado.

En primera instancia hay que especificar cómo se gestionan los controladores mediante el `controller_manager`. Este agente se ejecuta dentro del nodo principal del robot, donde previamente se ha establecido las interfaces de hardware mencionadas anteriormente, con esto se ofrece una serie de servicios con los que se le puede hacer peticiones sobre la carga, descarga y cambio de controladores:

- `/rob-cib_hexapod/controller_manager/list_controllers`: Devuelve una lista de los controladores y su estado (ejecutando o parado).
- `/rob-cib_hexapod/controller_manager/load_controller`: carga un controlador.
- `/rob-cib_hexapod/controller_manager/unload_controller`: para y quita un controlador.
- `/rob-cib_hexapod/controller_manager/switch_controller`: cambia el controlador de una interfaz de hardware. Para un actuador y dos controladores cargados del mismo, cambia el activo al que se desee.

Por cada controlador instanciado en ROS, se tienen una serie de mensajes y servicios con los cuales se puede gobernar sobre el controlador, se estudiarán dos aspectos: el cambio de los parámetros PID y la orden de referencia.

¹En este caso, estado de un actuador se corresponde a la posición, velocidad y esfuerzo en unidades del sistema internacional.

Para cambiar los parámetros de control durante la ejecución, se debe recurrir a los siguientes servicios dependiendo del controlador activo en ese momento:

- `/rob-cib_hexapod/pata1_position_controller/set_parameters`
- `/rob-cib_hexapod/pata1_velocity_controller/set_parameters`

Los campos a completar se corresponden con los parámetros PID de igual manera que se ha realizado previamente.

Por otro lado, para ordenar una posición o velocidad de referencia que debe alcanzar como entrada escalón, se recurre a la publicación de los siguientes mensajes, una vez de nuevo, dependiendo del controlador activo:

- `/rob-cib_hexapod/pata1_position_controller/command`
- `/rob-cib_hexapod/pata1_velocity_controller/command`

Para que el sistema no falle, este último mensaje debe ser publicado de forma periódica.

Todos los ejemplos han sido empleando la pata 1, pero son perfectamente extrapolables a cualquier otra pata cambiando el número por su correspondiente.

Es necesario aclarar, que cada vez que se cambia o se para un controlador, este pierde la referencia de posición o velocidad y por tanto, es necesario que se esté publicando el mensaje de comandado frecuentemente.

4. Interfaz de control

En este punto el robot es capaz de ser controlado, pero la cantidad de información, mensajes y servicios es abrumadora. Para simplificar este problema se ha introducido una nueva capa sobre el control, que manejará este tráfico.

El paquete resultante fue `/rob-cib_hexapod_controller_interface` que implementa una interfaz sobre el control que lo simplifica.

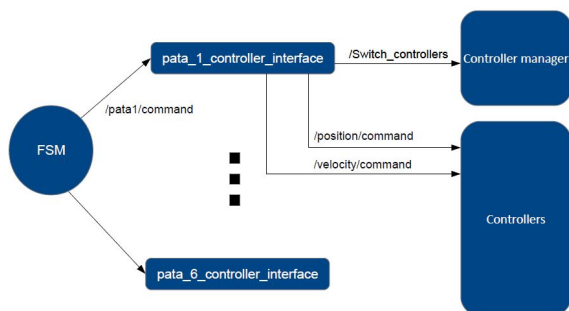


Figura 4: Diagrama de funcionamiento del */rob-cib_hexapod_controller_interface*.

El paquete desarrollado, contiene un nodo de ROS con el mismo nombre que publica todos los mensajes necesarios y llama a los servicios pertinentes, según lo que se le haya pedido en el servicio creado de forma específica para la funcionalidad.

Los principales aspectos que se pretenden conseguir con este paquete son:

1. Simplificar el control del robot.
2. Asegurar que todos los mensajes necesarios de control queden cubiertos.
3. Prevenir fallos antes de comandar.
4. Publicar los mensajes de comando de forma periódica.
5. Simplificar el código.

Siguiendo estas metas, el nodo realiza las siguientes funciones:

- Toma en cuenta qué tipo de control está activo, cambia mediante el servicio */switch_controller* el controlador que es necesario.
- Comprueba que el valor del comando es coherente y publica de forma periódica el mensaje */command* del tipo que se necesita, bien sea de posición o de velocidad.

Se debe ejecutar un nodo por cada una de las patas. Esto es muy importante ya que para que se publique la información de manera correcta el nodo debe saber qué pata está controlando, esto se consigue pasando como argumento la pata correspondiente, por ejemplo, para la pata 1 se pasaría: *pata1*.

Para superar el obstáculo que pueda suponer que el mensaje de comando se tenga que emitir cada cierto tiempo, el nodo de *rob-cib_hexapod_controller_interface* se encargará de ello. El mensaje de */command* es publicado de forma periódica, en este caso con una frecuencia de 10 Hz. Dos motivos han llevado a esta decisión:

- Frecuencias muy altas suponen mucho coste computacional.
- Frecuencias por debajo de los 2 Hz se ha comprobado que el comportamiento es errático.

Teniendo estos dos factores en cuenta se ha decidido con eurística que la frecuencia de mensaje debe ser de los 10 Hz mencionados anteriormente.

El nodo creado debe ser comandado a su vez de alguna forma, para esto se ha escogido un servicio creado ad-hoc para la aplicación. Este servicio se convierte en el único que el usuario debe tener en cuenta para el control.

Este servicio recibe el nombre de */c_leg_command*. Este, necesita dos argumentos:

- El valor de la nueva referencia en unidades del sistema internacional, esto es [rad] para posición y [rad/s] para velocidad.
- Si es valor de posición o de velocidad.

El servidor devuelve el mensaje de servicio con un campo booleano que indica si la instrucción ha podido realizarse (valor verdadero) o no (valor falso).

La cantidad de información a manejar se ha reducido significativamente con la inclusión de la interfaz de control, sin embargo, para que resulte aún mas sencillo se ha decidido incluir una librería de C++ dentro del mismo paquete.

De esta manera nació la librería *CLeg* que implementa la clase del mismo nombre cuyo objetivo es el repetido en múltiples ocasiones ya en el texto, simplificar y mejorar la accesibilidad al usuario. La librería busca implementar una clase que sea más intuitiva de manejar por el usuario y que a su vez mejore la legibilidad del código.

Para declarar una instancia de la clase pata C o *CLeg*, se necesitan de dos argumentos:

- El número de pata
- El *NodeHandle* del nodo que hace uso de la librería.

El primer argumento busca saber a qué pata hace referencia. El node handle es necesario para avisar al maestro de ROS de que es un cliente, necesario para llevar al cabo la llamada al servicio */c_leg_command*.

Los métodos públicos que permiten los objetos de la clase son los siguientes:

- ***updateState()***: recoge el último mensaje de */robcib_hexapod/joint_state* y actualiza los campos del objeto de posición, velocidad y esfuerzo.
- ***getPos()***: actualiza el estado y devuelve la posición de la pata en [rad].
- ***getVel()***: actualiza el estado y devuelve la velocidad de la pata en [rad/s].
- ***getEff()***: actualiza el estado y devuelve el esfuerzo de la pata en [Nm].
- ***getEstControl()***: devuelve TRUE si el control es de posición y FALSE en caso contrario.
- ***setPosition(float value)***: comanda el valor *value* como posición. Comprueba si el control es ya de posición, si no lo cambia y comienza a publicar de forma periódica el mensaje de comando.
- ***setVelocity(float value)***: comanda el valor *value* como velocidad. Comprueba si el control es ya de velocidad, si no lo cambia y comienza a publicar de forma periódica el mensaje de comando.

Con esto se completa la descripción de las herramientas para el desarrollo de los modos de marcha en el robot.

5. Modos de marcha basados en máquinas de estados

Para desarrollar cómo se implementan mediante máquinas de estados un modo de marcha, se ejemplificará mediante el planteamiento para la marcha de trípode alterno.

El trípode alterno es un modo de marcha característicos donde dos trípodes, constituidos por 3 patas distintas cada uno, realizan un semiciclo de avance sobre el terreno con una apertura que denominaremos como ángulo de avance, mientras que la otra gira a mayor velocidad en el aire buscando ponerse en la posición inicial en tierra y alternaran sus posiciones girando siempre los dos trípodes en el mismo sentido. Esta constituye una de las marchas más básicas y características del robot.

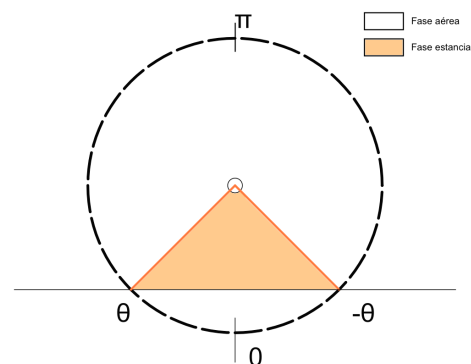


Figura 5: Fases aérea y terrestre.

En este caso, los trípodes 6 en cuestión serán:

- Trípode 1: patas 1 - 4 - 5
- Trípode 2: patas 2 - 3 - 6

Se parte de la premisa que el robot va a comenzar apoyado en tierra sobre su chasis.

Se distinguen tres estados en este modo de marcha:

- **Reposo**: Todas las patas en posición 0. El robot se queda erguido sobre sus patas.
- **Movimiento 1**: Trípode 1 en velocidad de tierra y el trípode 2 en velocidad de aire.
- **Movimiento 2**: Trípode 1 en velocidad de aire y trípode 2 en velocidad de tierra.

Una vez establecidos los estados, falta por determinar las condiciones de transición entre ellos:

- **Reposo a Mov 1**: las patas se encuentran en 0 y se da la señal de comienzo.

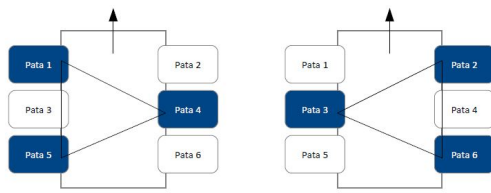


Figura 6: Trípodos.

- **Mov 1 a Mov 2:** trípode 1 en posición de despegue y trípode 2 en aterrizaje.
- **Mov 1 a Mov 2:** trípode 1 en posición de aterrizaje y trípode 2 en despegue.
- **De cualquier estado a Reposo:** señal de paro, emergencia o error no detectado.

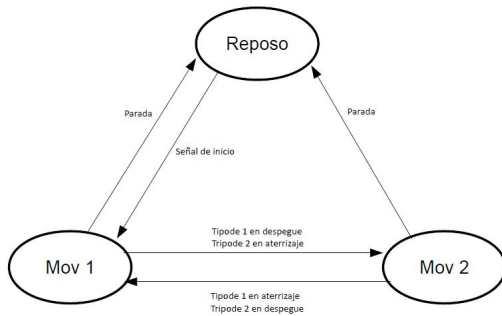


Figura 7: Máquina de estados del trípode alternativo.

Una vez que se han definido los estados, las acciones en los estados y las transiciones entre los mismos, queda definida la máquina de estados de la marcha. La traducción a código en C++ con la librería *CLeg* es directa.

Es necesario distinguir que en el estado reposo las patas se comandan por posición, mientras que en el resto se hace por velocidad.

La metodología seguida es aplicable para cualquier modo de marcha. Además, dentro de este planteamiento se podría añadir un cuarto estado intermedio de posicionamiento de las patas a la primera posición de despegue y aterrizaje. Si se deseara realizar, basta con añadir un estado y sus transiciones correspondientes, siendo mínimos los cambios en el resto de elementos ya planteados.

Esto demuestra la flexibilidad del método para incluir nuevos estados como puedan ser los de respuesta ante perturbación o error causado por el entorno.

6. Conclusiones

En base a todos los puntos desarrollados, los robots hexápodos con un grado de libertad en sus articulaciones, tienen una gran versatilidad a la hora de superar diferentes terrenos y obstáculos debido a que puede adoptar una gran cantidad de marchas diferentes.

Esto causa que el control tenga cierta sofisticación y una gran cantidad de información que manejar. Esto se ha solucionado con el paquete *rob-cib-controller-interface* que implementa la clase *CLeg* cuyos métodos permiten el dar comandos a cada una de las patas, sin tener que publicar directamente los múltiples mensajes que nos requiere *ros_control*.

Los archivos y códigos fuente no se han publicado en un repositorio aún dado que se trata de un proyecto en desarrollo.

Por otro lado, los modos de marcha pueden ser muy complejos si se plantean como flujogramas, en cambio, mediante máquinas de estado se consigue que el problema sea modular y flexible facilitando su planteamiento. Las máquinas de estado admiten modificaciones con un menor número de cambios que otras metodologías como los flujogramas. Además, se puede añadir estados a los que pasar por defecto en caso de encontrarse en una situación no esperada, esto resulta en marchas más robustas ante errores o perturbaciones.

Agradecimientos

Esta investigación ha recibido fondos del proyecto RoboCity2030-III-CM (Robótica aplicada a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos. fase III; S2013/MIT-2748), financiado por los Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid y los Fondos Estructurales de la Unión Europea, y del proyecto DPI2014-56985-R (Protección robotizada de infraestructuras críticas), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España.

Referencias

- [1] CAMPBELL, D., AND BUEHLER, M. Stair descent in the simple hexapod 'rhex'. *Amulatory Robotics Laboratory, Centre for Intelligent Machines, McGill University* (s.f.).
- [2] JESUS TORDESILLAS TORRES, JORGE DE LEON RIVAS, J. D. C. A. B. Modelo cinemático de un robot hexápodo con c-legs. *ETSII - UPM* (2016).
- [3] KODLAB. The rhex hexapedal robot. <http://kodlab.seas.upenn.edu/RHex/Home>. Consultado el 24 de Abril de 2017.
- [4] MOORE, E. Z. Leg design and stair climbing control for the rhex robotic hexapod. Master's thesis, Department of Mechanical Engineering McGill University, 2002.
- [5] NEVILLE, N., AND BUEHLER, M. Towards bipedal running of a six-legged robot. *Amulatory Robotics Laboratory Centre for Intelligent Machines, McGill University* (s.f.).
- [6] RIVAS, J. D. L. Definición y análisis de los modos de marcha de un robot hexápodo para tareas de búsqueda y rescate. Master's thesis, Escuela técnica superior de ingenieros industriales - Universidad politécnica de Madrid, 2015.
- [7] SICILIANO, B., AND KHATIB, O., Eds. *Handbook of robotics*. Springer International Publishing, 2016.
- [8] TORRES, J. T. Diseño y simulación del sistema de locomoción de un robot hexápodo para tareas de búsqueda y rescate. Master's thesis, Escuela técnica superior de ingenieros industriales - Universidad politécnica de Madrid, 2016.
- [9] ULUC SARANLI, A. A. R., AND KODITSCHKEK, D. E. Model-based dynamic self-righting maneuvers for a hexapedal robot. *Robotics Institute, Carnegie Mellon University Department of Electrical Engineering and Computer Science The University of Michigan* (2004).
- [10] ULUC SARANLI, M. B., AND KODITSCHKEK, D. E. Rhex - a simple and highly mobile hexapod robot. *Department of Electrical Engineering and Computer Science The University of Michigan and Center for Intelligent Machines McGill University Montreal* (2001).

USING AN UAV TO GUIDE THE TELEOPERATION OF A MOBILE MANIPULATOR

Josep-Arnau Claret

Institute of Industrial and Control Engineering (IOC), UPC, Barcelona, Spain; josep.arnau.claret@upc.edu

Luis Basañez

Institute of Industrial and Control Engineering (IOC), UPC, Barcelona, Spain; luis.basanez@upc.edu

Abstract

In this paper, a new teleoperation system consisting on the integration of a mobile manipulator, an UAV, and a haptic is presented. The camera of the UAV is used to give visual feedback to the operator. An algorithm is presented to allow the operator to command both the UAV and the mobile manipulator while keeping the point of view pointing towards the robot by only using a single haptic device. The presented algorithm combines a position-position and a position-velocity workspace mapping from the haptic to the mobile manipulator and the UAV, both in position and orientation. Further, a solution is presented that takes advantage of the null space of the mobile manipulator to keep the body and the arm of the mobile manipulator from occluding its own TCP and the object it is carrying, thus easing the teleoperation task. Experimentation has been carried on the system, both in a virtual and a real scenario, showing its potential in teleoperation scenarios. Overall, a novel teleoperation system and the ongoing progress towards its implementation in real situations is presented in this work.

keywords: Teleoperation, mobile manipulator, UAVs, workspace mapping, redundancy, null space

1 INTRODUCTION

The appearance of robots has had a deep impact in modern industry, allowing for a unprecedented level of productivity and opening new possibilities. Since its beginnings, robots have been confined in closed industrial cells, mainly due to security constraints. Since then, there has been a strong interest in the robotic community to allow the robots to operate in unbounded environments. This interest has naturally led to the study of the properties of mobile manipulators.

Low-cost Unmanned Air Vehicles (UAV) have become very popular in recent years. The coordination of multiple UAVs [1] and UAV planning [2] are active areas of research. Remarkably, the combination of an UAV with a mounted camera opens a wide range of applications like exploration of disaster scenarios [3].

Unmanned Air Vehicles and mobile manipulator (MM) have been and are currently used in teleoperation tasks [4, 5]. The coordination with or without teleoperation of a ground mobile robots and UAVs can be found in the literature for multiple tasks [6, 7, 8]. Remarkably, to the author's knowledge, no work allows to command the camera of an UAV to simultaneously teleoperate a mobile manipulator.

Workspace mapping algorithms are a key component in teleoperation systems. They map the input commands of the operator, usually from a haptic device or a joystick, to the robot workspace. This mapping is usually done in the position dimension, using a mapping from the haptic position to the robot position (*position-position* mapping), a *position-linear velocity* mapping, or an hybrid mapping, and it has to account for the scaling and the unbound workspace for mobile robots [9, 10]. Dynamic point of view, which deals with the orientation, can also be found for robot teleoperation [11] and in the exploration of virtual environments [12].

The Jacobian null space has been widely used in the robotic community to execute multiple tasks in a robot with different levels of priority [13, 14]. Its use ranges from the most common tasks to avoid singularities and object collisions, to convey emotions to users [15].

The first contribution of this work is to present a novel position and orientation workspace mapping algorithm which allows an operator to command a mobile manipulator while simultaneously and continuously changing the point-of-view of an UAV with a mounted camera from which the operator obtains visual feedback from the scene. Second, the Jacobian null space of the mobile manipulator is studied to avoid the robot to occlude its own TCP, thus easing the teleoperation task.

The rest of this paper is organized as follows. First, Section 2 presents the mobile manipulator used in this work. Section 3 introduces the workspace mapping algorithm. The algorithm to exploit the null space of the robot is presented in Section 4. Section 5 presents the advances in the implementation. Finally, the conclusions can be found in Section 6.

2 THE BARCELONA MOBILE MANIPULATOR

The robot used in this work is the Barcelona Mobile Manipulator (BMM). The BMM consists of an omni-directional mobile platform with an arm manipulator (Fig. 1). It is composed by a main body of 138 kg and $1 \times 0.78 \times 0.708 \text{ m}^3$. The platform has three degrees of freedom: two independent translations and a rotation around the vertical axis. The arm manipulator used is a Kuka LWR 4+. It has seven degrees of freedom. Overall, the BMM has ten degrees of freedom. EtherCat is used to control the wheels while Orocos is used for the high level control in a Linux Xenomai environment over a PC with four Intel Core i5 CPUs at 3.1GHz. For further details on the platform see [16].

As ultimately it is intended to implement the proposed approach to teleoperate the BMM while the camera of a Parrot AR.Drone is sending the video of the scene to the operator, the kinematic model of the BMM has been in this work. The first steps towards this goal can be found in [17].

Inverse kinematics

The algorithm to command the TCP is presented following [18]:

$$\dot{q} = J^+ \dot{x} = J^+ \left[L^{-1} \left(\dot{p}_{si}^s + K_P e_p \right) \right] \quad (1)$$

where:

- $e_p = p_{si}^s - p_r^s$.
- $e_o = \frac{1}{2} [n_R(q) \times n_D + s_R(q) \times s_D + a_R(q) \times a_D]$; with n , s , and a the columns of $R = R_r^s$ and $D = R_{si}^s$.
- $L = -\frac{1}{2} [S(n_D)S(n_R) + S(s_D)S(s_R) + S(a_D)S(a_R)]$.

where $S(\cdot)$ is the cross product matrix.

Once q is obtained by integrating \dot{q} , $T_r^s(q)$ can be computed using the direct kinematics. This algorithm allows a real time tracking of the robot TCP, both in position and orientation.

The computation of T_{si}^s to obtain p_{si}^s and R_{si}^s is presented in the next Section.

3 THE TELEOPERATION SYSTEM

3.1 OVERVIEW

Multiples frames need to be defined in this work prior to the introduction of the workspace mapping algorithm (Fig. 2): mo , the master inertial frame, a.k.a., the frame of the origin of the workspace of the haptic; mi , the frame of the tip of the haptic device; s , the inertial



Figura 1: The Barcelona Mobile Manipulator.

frame at the remote side, a.k.a., the mobile manipulator workspace frame; so , the frame of the origin of the haptic workspace in the remote inertial frame; si , the frame of the haptic tip in the remote inertial frame; c , the frame attached to the free-flying camera; and r , the robot end-effector frame.

Given an homogeneous transformation matrix $T_i^j \in SE(3)$, composed of a rotation matrix and a translation, $R_i^j \in SO(3)$ and $p_i^j \in \mathbb{R}^3$, respectively, which expresses the frame i w.r.t. the frame j , $T_i^j \in SE(3)$ can be used to represent a position vector expressed in a frame i into a new frame j .

During a teleoperation task, T_{mi}^{mo} contains the information of the operator command to the system through the haptic. p_{mi}^{mo} is scaled by $K_S = \text{diag}(k_{SX}, k_{SY}, k_{SZ})$ as $p_{si}^{so} = K_S p_{mi}^{mo}$. The scales need to be adjusted separately depending on the X , Y or Z dimension. This is convenient because it allows the adjustment between the workspace of the haptic and the manipulator. T_{si}^{so} corresponds to the input of the user from the haptic in the MM workspace and is composed of a translation and a rotation, $K_S p_{mi}^{mo}$ and R_{mi}^{mo} , respectively.

Given that $T_{si}^s = T_{so}^s T_{si}^{so}$ it follows that:

$$\begin{aligned} p_{si}^s &= p_{so}^s + R_{so}^s K_S p_{mi}^{mo} \\ R_{si}^s &= R_{so}^s R_{mi}^{mo} \end{aligned} \quad (2)$$

From Fig. 2 it can also be noted that:

$$T_c^s = T_{so}^s T_c^{so} \quad (3)$$

where T_c^{so} is a constant transformation that couples the frames c and so .

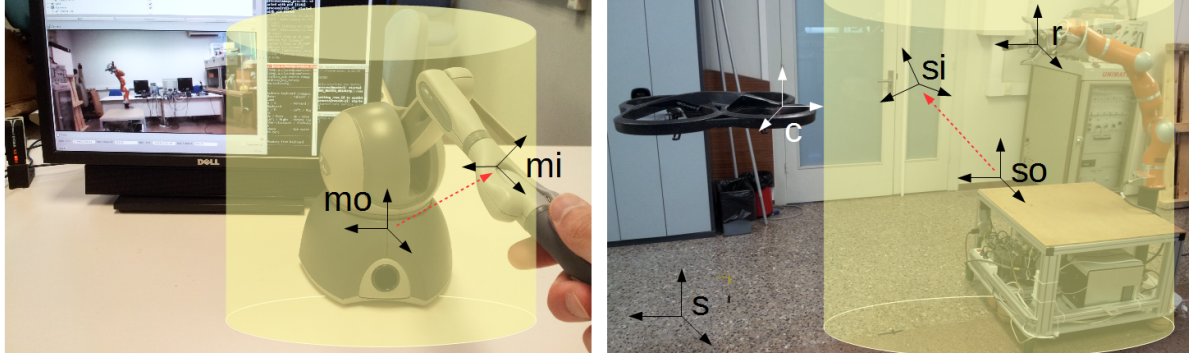


Figura 2: The teleoperation system. Left: The haptic and the screen with visual feedback from the UAV. Right: The haptic workspace (in yellow) is mapped into the workspace of the robot. Red arrows depict the user command.

Finally, T_r^s is obtained from the computation of the MM inverse kinematics (Sect. 2).

3.2 ADOPTED APPROACH

The proposed approach extends the solution presented in [19] to a mobile manipulator. But in this work the technique is also applied to the orientation by using a free-flying camera.

3.2.1 The position mapping

W.r.t. the position, when the user commands the tip of the haptic device *inside* the mobile manipulator TCP is commanded using a *position-position* mapping between the haptic tip position and the robot TCP. When the boundary of the haptic workspace, roughly defined as a thick frontier containing the external workspace boundary, is reached, a *position-linear velocity* component is added to the previous *position-position*. This combination of inputs allows the user to command the TCP of the mobile manipulator in an unbounded workspace through the bounded workspace of the haptic device.

A "cylindric bubble" is used as haptic workspace to adapt the solution in [19] to the workspace of mobile manipulator (Figs. 2-3): the Z position is commanded by a *position-position* map (Eq. 2) and the *position-linear velocity* is activated in the XY plane when the distance from the haptic tip to the Z axis of the frame mo , D_V , is higher than a predefined radius R_V . Formally this can be expressed as:

$$\begin{aligned} \dot{p}_{so}^s &= \left(1 - \frac{R_V}{D_V}\right) k_V u_{siXY}^s = \\ &= \left(1 - \frac{R_V}{D_V}\right) k_V R_{so}^s K_S u_{miXY}^{mo} \end{aligned} \quad (4)$$

with $k_V > 0$, the maximum allowed velocity; u_{miXY}^{mo} , the unit vector of $p_{miXY}^{mo} = [p_{miX}^{mo}, p_{miY}^{mo}, 0]^T$; and $D_V = \|p_{miXY}^{mo}\|$. The term $(1 - R_V/D_V)$ allows for increasing velocities from zero ($D_V = R_V$) to the maximum defined in k_V ($D_V \rightarrow \infty$). Thus, the farther away

the haptic tip is from the vertical axis at its workspace, the fastest the MM will move in the same direction.

Differentiating, translation in Eq. 2 and Eq. 4 can be unified:

$$\begin{aligned} \dot{p}_{si}^s &= \left(1 - \frac{R_V}{D_V}\right) K_V R_{so}^s K_S u_{miXY}^{mo} \chi_{[R_V, \infty)}(D_V) + \\ &+ R_{so}^s K_S \dot{p}_{mi}^{mo} \end{aligned} \quad (5)$$

where $\chi_C(x)$ is the indicator function.

Additionally, in order for the operator to feel that he has entered in the *position-linear velocity* area, a force F can be applied to the user, with the force pointing towards the haptic workspace Z axis, and proportional to the distance from the Z axis:

$$F = -k_f^V R_{so}^s (K_S u_{miXY}^{mo} - K_d \dot{u}_{miXY}^{mo}) \chi_{[R_V, \infty)}(D_V)$$

with:

$$k_f^V = \left(1 - \frac{R_V}{D_V}\right) K_f$$

Note that a damping has been added in the previous expression. The purpose of this it to prevent the platform from moving if the user releases the haptic tip.

3.2.2 The orientation mapping

The free-flying-camera allows the operator to use the *position-linear velocity* mode on the orientation, enabling an *orientation-angular velocity* map.

The *orientation-angular velocity* control is activated when the haptic orientation surpasses a predefined boundary. This boundary can be defined using the ZYX intrinsic Euler angles as:

$$R_{mi}^{mo} = \begin{pmatrix} c_\beta c_\gamma & s_\alpha s_\beta c_\gamma - c_\alpha s_\gamma & c_\alpha s_\beta c_\gamma + s_\alpha s_\gamma \\ c_\beta s_\gamma & s_\alpha s_\beta s_\gamma + c_\alpha c_\gamma & c_\alpha s_\beta s_\gamma - s_\alpha c_\gamma \\ -s_\beta & s_\alpha c_\beta & c_\alpha c_\beta \end{pmatrix} \quad (6)$$

with $s_a = \sin a$ and $c_a = \cos a$. The Euler angles can be retrieved as $\alpha = \text{atan2}(r_{32}, r_{33})$, $\beta = \text{atan2}(r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2})$ and $\gamma = \text{atan2}(r_{21}, r_{11})$.

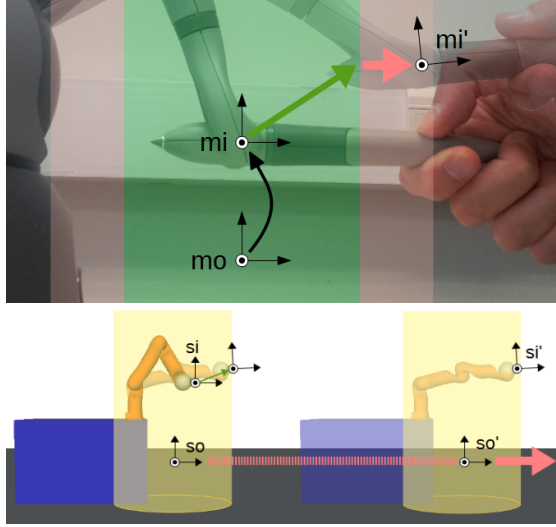


Figura 3: Position mapping. Top figure: in the green area the haptic position is mapped to a translation in the haptic workspace in the scenario (yellow volume in the bottom figure). Bottom figure: in the pink area (boundaries of the haptic workspace) the position is also mapped to the linear velocity and a gross motion on the platform is generated.

The *orientation-angular velocity* gets active when $|\beta| > \beta_B$ and $|\gamma| > \gamma_B$. Next, the frame R_{so}^s is rotated around \hat{Z} , the vertical axis, according to the rotation direction specified by the user. The angular velocity is proportional to the amount of penetration of the user into the *orientation-angular velocity* zone (Fig. 4, pink area) inside the workspace of the haptic.

By differentiating the equation in Eq. 2 the equation $\omega_{si}^s = \omega_{so}^s + R_{so}^s \omega_{si}^{so}$ is obtained, with each ω corresponding to an angular velocity. Then the *orientation-angular velocity* mode can be imposed with:

$$\omega_{so}^s = \text{sign}(\gamma) k_R \left(1 - \frac{\gamma_B}{|\gamma|}\right) \hat{Z} \chi_{[\gamma_B, \infty)}(\gamma)$$

From Eq. 3, T_c^s can be obtained by updating p_{so}^s and R_{so}^s .

3.3 SUMMARY

Summarizing the algorithm can be presented as:

1. $p_{miXY}^{mo} = [p_{miX}^{mo}, p_{miY}^{mo}, 0]^T$
2. $D_V = \|p_{miXY}^{mo}\|$
3. if $D_V > R_V$:

$$p_{so}^s = p_{so}^s + \left(1 - \frac{R_V}{D_V}\right) k_V R_{so}^s K_S \frac{p_{miXY}^{mo}}{D_V} \Delta t$$
4. $\beta = \text{atan2}(r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2})$
 $\gamma = \text{atan2}(r_{21}, r_{11})$

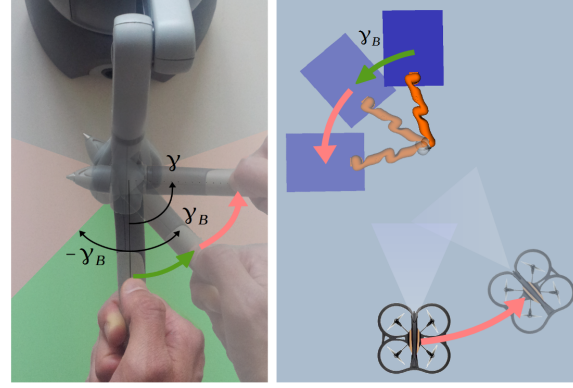


Figura 4: Rotation mapping. The haptic orientation around the Z axis in the green area is mapped to the camera orientation. In the pink area the orientation is also mapped to an angular velocity.

5. if $|\beta| > \beta_B$ and $|\gamma| > \gamma_B$:

$$R_{so}^s = \left[I + \text{sign}(\gamma) k_R \left(1 - \frac{\gamma_B}{|\gamma|}\right) S(\hat{Z}) \Delta t \right] R_{so}^s$$

6. $T_{si}^s = (p_{so}^s + R_{so}^s K_S p_{mi}^{mo}, R_{so}^s R_{mi}^{mo})$

7. $T_c^s = T_{so}^s T_c^{so}$

4 EXPLOITING THE NULL SPACE

This particular configuration between a mobile manipulator, a haptic, and a UAV which gives visual feedback to the operator opens new possibilities.

For instance, the high degree of redundancy of the mobile manipulator can be exploited to improve the user experience and to ease the teleoperation task. The Jacobian null space is an elegant and well known framework to exploit the redundancy of a robotic system [13, 14].

In this work, the null space has been exploited to allow the operator to have a better view of the TCP of the robot and thus the object it is carrying. This is done by minimizing the chances that the robot body and arm intersect the line of sight of the operator.

With this approach, the first task of the robotic system is set to track the TCP and to rotate the camera as explained in the workspace mapping algorithm, while the robotic redundancy is exploited to keep the links and the platform of the robot away from the line that goes from the robot TCP to the focal point as a secondary task.

The two tasks stated above implemented in our robotic system can be formalised by extending the solution in Eq. 1 using the null space as:

$$\dot{q} = J^+ \dot{x} + N \dot{q}_0 \quad (7)$$

with the null space projection operator $N = I - J^+ J$ and \dot{q}_0 containing the joint velocity that keeps the

robot away from occluding the TCP object from the user sight, as explained next.

4.1 THE OBJECT BEST VIEW APPROACH

To compute \dot{q}_0 it is necessary to define a function that carries the information of the object and the camera, and that outputs the robot motion required to maximize some object view quality measure. To do so, the object best view task can be implemented using the force field formulation, in a similar way as a joint limit avoidance task.

With the force field formulation, an *escape* velocity in the Cartesian space is generated to be applied to the point of the robot which position is between the object and the operator and which position in the image is closest to the object position in the image plane.

The main idea is to compute the distance *in the image* between the projected TCP and each of the links of the robot and the platform. With this approach, some advantage can be obtained by previously discarding those links that are behind the TCP, as they won't pose any problem for the operator task.

From the set of computed distances, the smallest is selected and, if it is lower than a predefined threshold, it is considered that the teleoperated object is occluded by the corresponding robot link. Next, the escape velocity is computed parallel to the image plane and moving the link away from the TCP.

Following, the described algorithm is presented in a more formal way.

1. For each link $i = 1, 2, 3$, the points p_i^H are computed where:

- p_1^H is at the centre of the platform surface.
- p_2^H is the intersection of the links 1 and 2.
- p_3^H is the intersection of the links 3 and 4.

A set P_H is then constructed: $P_H = p_1^H, p_2^H, p_3^H$.

2. The p_i^H that are not between the TCP and the image plane are removed from P_H , that is, if

$$(p_{i,xy}^H - p_{TCP,xy})^T n_{CAM,xy} > 0$$

where:

- a_{XY} is the projection of vector a in the XY -plane.
 - p_{TCP} is the position of the mobile manipulator TCP.
 - n_{CAM} is the normal vector of the image plane, pointing towards the TCP.
3. p_{TCP} is transformed to the camera image plane reference frame, as the remaining points in P_H , obtaining c_{TCP} , and c_i^H , respectively.

4. For each point c_i^H :

- (a) For each link the point c_i^L is computed, which corresponds to the projection of the previous point in the robot structure, projected in the image plane.
- (b) The point, c_i^* , in each link i which is closest to the TCP in the image plane is computed as $c_i^* = c_i^L + \lambda_i n_i$, with $n_i = c_i^H - c_i^L$, easily obtained with the λ_i that minimizes the squared distance

$$\left(\frac{c_{ix}^L + \lambda_i n_{ix}}{c_{iz}^L + \lambda_i n_{iz}} - \frac{v_{TCPx}}{v_{TCPz}} \right)^2 + \left(\frac{c_{iy}^L + \lambda_i n_{iy}}{c_{iz}^L + \lambda_i n_{iz}} - \frac{v_{TCPy}}{v_{TCPz}} \right)^2$$

and with v_{TCP} as the vector from the image focal point to the TCP of the mobile manipulator, p_{TCP} .

- (c) If the distance $d_i = \|c_i^* - c_{TCP}\| < \varepsilon_i$ the point c_i^* is retained, as it is occluding the TCP, and, thus, the teleoperated object.

5. The c_i^* with the smallest d_i is selected, that is, $c_i^m = \min_d(c_i^*)$.
6. The *escape* velocity, v_{esc} , is computed as: v_{esc} is applied to p_i^* , the point corresponding to c_i^* in the world frame at the third priority level. Thus the intermediate Jacobian $J_2 = \partial c_i^* / \partial q$ is computed in position as the linear interpolation (interpolating with λ_i) of the Jacobians of p_{i-1}^H and p_i^H , and with the orientation part of the Jacobian of p_{i-1}^H .

Finally, \dot{q}_0 can be computed as $\dot{q}_0 = J_2^+ v_{esc}$, and fed into Eq. 7.

4.2 IMPLEMENTATION

Considering the implementation of the presented robotic system, a Sensable Phantom Omni has been used as the haptic device. The UAV used has been the Parrot AR.Drone. The main algorithm, that is, the workspace mapping and the computation of the null space inputs, has been computed in an Intel Core i7 at 2.80GHz with Debian OS. The software has been implemented in C++.

The ROS framework has been used to integrate the different components of the system, mainly the haptic, the UAV, the BMM, and the workspace mapping. The nodes containing the haptic drivers and the workspace mapping, and the node to command the UAV have been executed in the main computer.

The input obtained from the haptic node is fed to the workspace mapping algorithm. The components obtained from this node are then processed in a manager node that generates the input signals to the free-flying camera, the Parrot AR-Drone, and to the mobile manipulator, the BMM, divided in to the commands of the

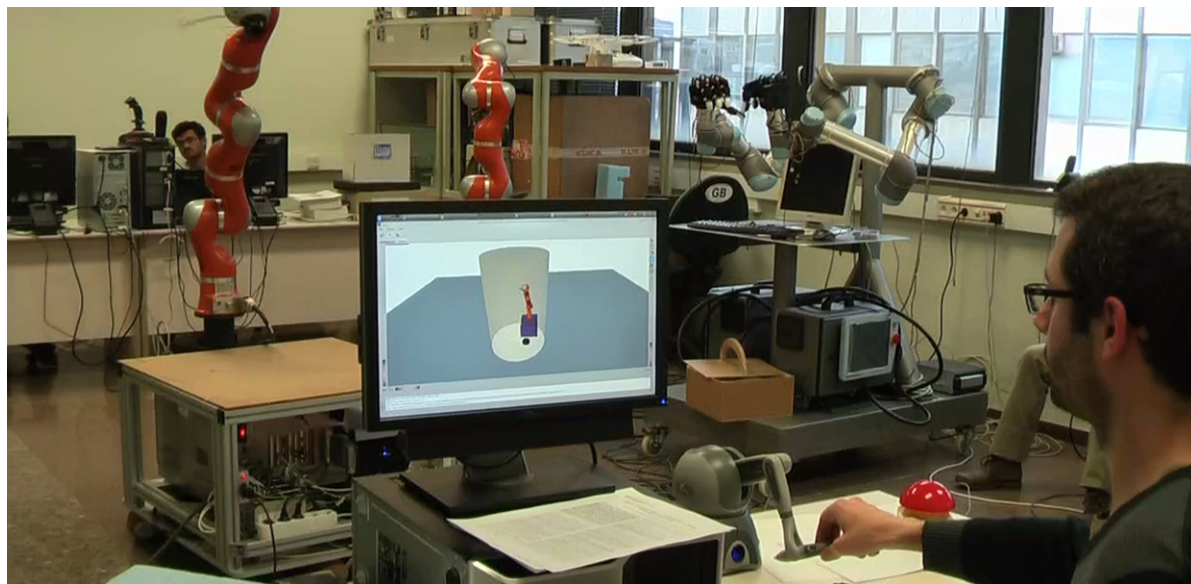


Figura 5: A scenario with a teleoperation task. The task is visualized in a virtual scenario.

platform and to the Kuka LWR. Optionally, the Kautham Project [20] has been configured to visualize the system in a virtual environment 5.

With this setup, several experiments have been done to test the system, initially solely in the virtual environment, and lately also in real situations.

5 CONCLUSIONS

A new robotic system that integrates a mobile manipulator, an UAV and a haptic device is presented. This system allows the teleoperation of the mobile manipulator using the visual feedback of the UAV camera.

An algorithm is presented that allows the operator to command the TCP of the mobile manipulator and the orientation of the UAV with respect to the robot using solely the haptic.

The Jacobian null space of the robot is exploited to ease the teleoperation task by avoiding the robot own occlusions as a secondary task.

The implementation setup of the proposed solution in the real system is presented.

Future work will also address a gross control of the UAV, and the integration of the proposed solution in a stack of tasks with a higher number of prioritized tasks.

Acknowledgments

*This work was partially supported by the Spanish Government through the projects DPI2013-40882-P, DPI2014-57757-R and DPI2016-80077-R, and the predoctoral grants BES-2012-054899.

Bibliografía

- [1] L. Merino, F. C. and J. R. Martinez-de Dios, J. Ferruz, and A. Ollero, "A cooperative perception system for multiple UAVs: Application to automatic detection of forest fires," *Journal of Field Robotics*, vol. 23, pp. 165–184, 2006.
- [2] L. Lin and M. A. Goodrich, "UAV intelligent path planning for wilderness search and rescue," in *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 709–714, Oct 2009.
- [3] S. M. Adams and C. J. Friedland, "A survey of unmanned aerial vehicle (UAV) usage for imagery collection in disaster research and management," in *Ninth International Workshop on Remote Sensing for Disaster Response*, 2011.
- [4] D. Lee, C. Ha, and Z. Zuo, "Backstepping control of quadrotor-type UAVs and its application to teleoperation over the Internet.," in *IAS (2)* (S. Lee, H. Cho, K.-J. Yoon, and J. Lee, eds.), vol. 194 of *Advances in Intelligent Systems and Computing*, pp. 217–225, Springer, 2012.
- [5] J. Park and O. Khatib, "A haptic teleoperation approach based on contact force control.," *I. J. Robotic Res.*, vol. 25, no. 5-6, pp. 575–591, 2006.
- [6] H. G. Tanner, "Switched UAV-UGV cooperation scheme for target detection," in *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, pp. 3457–3462, April 2007.
- [7] R. Rao, V. Kumar, and C. Taylor, "Visual servoing of a UGV from a UAV using differential flatness," in *Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ In-*

- ternational Conference on*, vol. 1, pp. 743–748 vol.1, Oct 2003.
- [8] K. E. Wenzel, A. Masselli, and A. Zell, “Automatic take off, tracking and landing of a miniature UAV on a moving carrier vehicle,” *J. Intell. Robotics Syst.*, vol. 61, pp. 221–238, Jan. 2011.
 - [9] M. Frejek and S. B. Nokleby, “A methodology for tele-operating mobile manipulators with an emphasis on operator ease of use,” *Robotica*, vol. 31, pp. 331–344, 5 2013.
 - [10] F. Conti and O. Khatib, “Spanning large workspaces using small haptic devices,” in *Eurohaptics Conference, 2005 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005. World Haptics 2005. First Joint*, pp. 183–188, March 2005.
 - [11] A. Pérez and J. Rosell, “An assisted re-synchronization method for robotic teleoperated tasks,” in *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 886–891, May 2011.
 - [12] C. Ware and S. Osborne, “Exploration and virtual camera control in virtual three dimensional environments,” *SIGGRAPH Comput. Graph.*, vol. 24, pp. 175–183, Feb. 1990.
 - [13] A. Liégeois, “Automatic supervisory control of the configuration and behavior of multibody mechanisms,” *IEEE Trans Syst, Man, Cybern, Syst*, vol. 7, pp. 868–871, Dec 1977.
 - [14] B. Siciliano and J.-J. Slotine, “A general framework for managing multiple tasks in highly redundant robotic systems,” in *Advanced Robotics, 1991. 'Robots in Unstructured Environments', 91 ICAR., Fifth International Conference on*, vol. 2, pp. 1211–1216, June 1991.
 - [15] J.-A. Claret, G. Venture, and L. Basañez, “Exploiting the robot kinematic redundancy for emotion conveyance to humans as a lower priority task,” *International Journal of Social Robotics*, vol. 9, no. 2, pp. 277–292, 2017.
 - [16] D. Clos and J. Martínez, “Plataforma Mòbil amb Rodes Esfèriques per al Robot ”Lightweight Robot 4” de Kuka Roboter,” tech. rep., Institute of Industrial and Control Engineering - Technical University of Catalonia, June 2007.
 - [17] J. A. Claret, I. Zaplana, and L. Basañez, “Teleoperating a mobile manipulator and a free-flying camera from a single haptic device,” in *2016 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, pp. 291–296, Oct 2016.
 - [18] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo, *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer Publishing Company, Incorporated, 1st ed., 2008.
 - [19] L. Dominjon, A. Lecuyer, J. M. Burkhardt, G. Andrade-Barroso, and S. Richir, “The ”bubble” technique: interacting with large virtual environments using haptic devices with limited workspace,” in *Eurohaptics Conference, 2005 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005. World Haptics 2005. First Joint*, pp. 639–640, March 2005.
 - [20] J. Rosell, A. Pérez, A. Akbari, Muhayyuddin, L. Palomo, and N. García, “The kautham project: A teaching and research tool for robot motion planning,” in *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, pp. 1–8, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Sep 2014.

ESTUDIO DE LOS PATRONES DE MARCHA PARA UN ROBOT HEXÁPODO EN TAREAS DE BÚSQUEDA Y RESCATE

Jorge De León and Antonio Barrientos
CAR UPM-CSIC

jorge.deleon@upm.es, antonio.barrientos@upm.es

Resumen

En este artículo se profundiza en el estudio de los patrones de marcha para robots hexápodos con extremidades denominadas C-legs. En el estudio se analizan varios modos de marcha que distintos tipos de seres vivos emplean para desplazarse por el medio terrestre, y otros nuevos que se plantean al ver las limitaciones que presentan los existentes en la actualidad. Todo el estudio se ve reforzado con una serie de simulaciones realizadas donde los resultados obtenidos se analizan para seleccionar cuál es el mejor modo de marcha para una situación en concreto.

Palabras clave: Robots hexápodos, C-legs, patrones de marcha, búsqueda y rescate.

1. Introducción

La realización de este trabajo pretende dar un nuevo enfoque a la robótica de búsqueda y rescate (USAR), en especial a los robots terrestres que en ella se emplean.

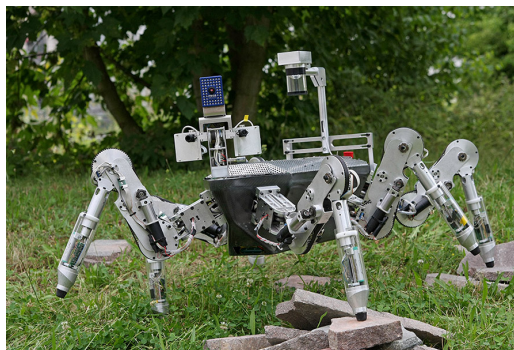
Lamentablemente la mayoría de los robots terrestres convencionales son incapaces de lograr sus objetivos ya que su modo de locomoción, la rueda o la oruga, es incapaz de solventar los obstáculos que se presentan. El nuevo diseño que aquí se presenta pretende servir de guía para nuevos desarrollos de robots bioinspirados, y reducir, de esta forma, los porcentajes de fracaso.

De todos los robots desarrollados mediante técnica de bioinspiración, un alto porcentaje están basados en la fisionomía de los hexápodos. La clase de los hexápodos es la clasificación de los artrópodos que más especies agrupa, incluyendo en ellos a los insectos. Estos, a su vez se pueden clasificar según su sistema de locomoción sea terrestre o aéreo. Sin embargo, los robots inspirados suelen imitar a los de locomoción terrestre debido a que su adaptación al ámbito de la ingeniería es más sencillo.

El FZI (Research Center for Information Technology) en Karlsruhe, Alemania, ha creado la familia LAURON, cuyo desarrollo va por la quinta gene-

ración (figura 1a). Este robot está dotado de diferentes modos de marcha y es capaz de mantener la estabilidad incluso en terrenos con numerosos obstáculos.

Otro ejemplo es el robot DIGbot, diseñado por la Case Western Reserve University, en Cleveland, Estados Unidos, y cuyo diseño de patas hace posible que pueda avanzar por troncos de árboles y paredes verticales, figura 1b.



(a) Robot LAURON IV



(b) Robot DIGbot

Figura 1: Ejemplos de robots hexápodos

Pero a pesar de que la cinemática de este tipo de robots está muy estudiada y resulta muy sencilla de implementar, la implementación mecánica y su control es muy complejo [6], por ello, se han desarrollado una nueva serie de robots que siguen siendo hexápodos pero presentan una nueva fisionomía en sus extremidades.

Estas nuevas extremidades tienen forma de letra *C* y permiten a este tipo de robots desplazarse

con unas velocidades mucho mayores y con unos requisitos mecánicos menores. Una ventaja de este tipo de robots es, entre otras, su capacidad de lo que se conoce en la literatura como "locomoción sin patas", por la cual los robots pueden superar obstáculos cuando ninguna de sus patas toca el suelo [1].

Un robot que describe este tipo de diseño es el RHex desarrollado bajo la financiación del DARPA en Estados Unidos, figura 2.



Figura 2: Robot RHex

A pesar de la gran proliferación de este tipo de robots, no se han realizado estudios que profundicen en el estudio cinemático de las patas de los mismos [4], [7], [9]. Sin embargo, este estudio es fundamental para este tipo de robots, condicionando el proceso de diseño y construcción de los mismos.

En este artículo se realiza el estudio de diversos modos de locomoción para este último tipo de robots y cuyos resultados han sido validados mediante simulaciones con un resultado correcto.

La estructura del artículo comienza con esta pequeña introducción, para continuar con el modelo del robot. Posteriormente, se procede a la definición de modos de marcha y, por último, se encuentran las pruebas y simulaciones realizadas, para terminar con las conclusiones del análisis.

2. Modelado del robot y sus patas

El robot que se ha empleado es un prototipo desarrollado por el grupo de Robótica y Cibernética de la Universidad Politécnica de Madrid ([7], [8]).

Este robot se ha diseñado con una serie de especificaciones para poder realizar tareas de búsqueda y rescate (USAR [5]) y también protección robotizada de infraestructuras críticas (PRIC [3]) en entornos que presentan distintos obstáculos como pueden ser edificios, complejos industriales, ... donde un robot convencional con ruedas no puede des-

plazarse por todo el área a vigilar.

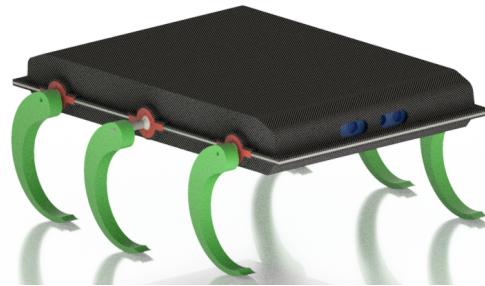


Figura 3: Render del robot diseñado

El primer requisito de diseño es poder superar una escalera, para ello según las conclusiones de los trabajos analizados es necesario que el diámetro de la pata sea igual o superior a la altura del escalón. Por lo que se ha seleccionado un tubo de acetal de 200mm de diámetro, con 4,5mm de espesor de pared y una anchura de 50mm y que son cortados en forma de *C*.

Con esta imposición de diseño, aparece una nueva restricción, la dimensión mínima del robot, que es la suma de los tres radios de las patas más el espesor de las mismas.

$$largo_{robot} > 3 \cdot (diámetro_{patas} + espesor_{patas}) \quad (1)$$

$$largo_{robot} > 613,5mm \quad (2)$$

Además de estas dos restricciones, existe otra que es que pueda clasificarse como un robot man-portable o man-packable.

Con esto, el diseño resultante es el que se puede observar en la figura 3.

3. Definición y evaluación de los patrones de marcha

Todos los hexápodos caminantes muestran la característica de ser estables; es decir que con las seis extremidades que poseen tienen buen apoyo sobre el terreno, de esta forma al retirar el apoyo de una, dos o tres extremidades, las cinco, cuatro o tres patas restantes siguen dando sustento; lo que significa que el hexápodo tiene ventajas en comparación con los bípedos y los cuadrúpedos al tener más puntos de apoyo y dar buen soporte al momento de generar los distintos modos de caminar.

3.1. Patrones de locomoción en la naturaleza

En base a la observación de la naturaleza, se pueden distinguir 3 tipos de marcha para los hexápo-

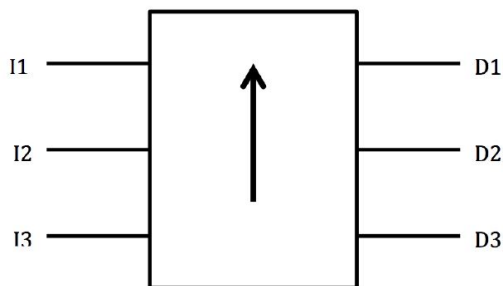


Figura 4: Esquema de la posición y definición de las patas de nuestro hexápodo

dos: de trípedo alterno, tetrápoda y de onda, cuyos patrones de marcha se pueden observar en la figura 5.

Trípedo alterno: Se mueven simultáneamente las extremidades I1, D2, e I3 durante un lapso de tiempo (ya sea hacia delante o hacia atrás) en el aire, área de negro; mientras que las extremidades D1, I2 y D3 permanecen en contacto con el suelo teniendo un movimiento contrario a las anteriores, área de blanco.

Tetrápoda: Se mueven por parejas de extremidades opuestas. Esto es, I1 y D3 se mueven (ya sea hacia delante o hacia atrás), áreas de negro, mientras que el resto permanece en el suelo. Dentro del lapso que dura su ciclo entra en acción la extremidad D2 de igual forma que en el anterior. A continuación las extremidades I3 y D1 hacen la misma acción que las anteriores pero durante su ciclo de trabajo. Y, por último, realiza el movimiento I2.

Onda: En este tipo de caminar las extremidades son independientes, cada una se mueve durante un lapso de tiempo (ya sea hacia delante o hacia atrás) y continúa la extremidad contigua.

3.2. Nuevos patrones de locomoción

Sin embargo, tal y como se ha demostrado a lo largo de la historia, el ser humano puede llegar a ser capaz de desarrollar cosas que la naturaleza no ha sido capaz. Por eso, en esta sección se van a presentar dos modos de marcha novedosos que no se han encontrado en ningún estudio biológico hasta la fecha.

El primero de ellos (*modo nuevo 1*) se podría definir como una variante de la marcha tetrápoda, pero en este caso la combinación de patas no presenta una transición suave. En lugar de establecer la marcha con una suave transición entre pares de

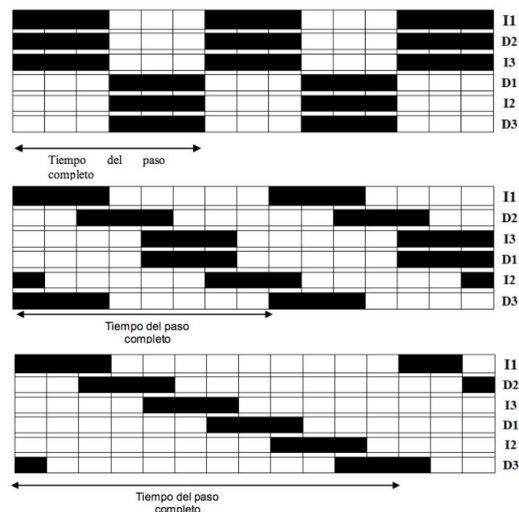


Figura 5: Modelos de marcha. (De arriba a abajo: Trípedo, tetrápoda y onda)

patas, se generara un patrón de movimiento en el que en cada secuencia siempre se moverá un par de patas, primero el delantero, luego el intermedio y por último el trasero, y de nuevo volverá a empezar el patrón.

Al implementar este modo se tendrá que realizar un buen cálculo de los pares y esfuerzos generados en el par que actúa, ya que en este tipo de movimiento no se presenta un apoyo tan grande como en otros movimientos.

El segundo movimiento diseñado (*modo nuevo 2*) puede parecer bastante rudimentario pero no por ello dejar de ser menos efectivo, está pensado para terrenos muy irregulares. En este caso todas las patas del robot se moverán conjuntamente en cada ciclo, es decir, pasará de estar totalmente apoyado a no presentar ningún apoyo y caer sobre el suelo.

Este movimiento puede presentar el inconveniente de ser agresivo con el robot por la gran cantidad de impactos que reciba en cada transición, pero no por ello se debe dejar de plantear.

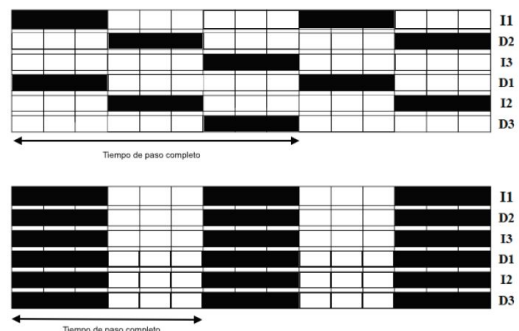


Figura 6: Nuevos modelos de marcha.

4. Simulaciones realizadas y resultados

Para poder obtener un análisis completo de los modos de marcha se han realizado una serie de pruebas donde se ponen a prueba todos los modos de marcha en condiciones diferentes. Las pruebas se han realizado en la plataforma virtual de programación de robots, ROS (Robot Operating System), y el simulador Gazebo.

Como en todo proceso de diseño, la parte de simulación proporciona muchos datos de interés sobre todo para detectar posibles elementos que han sido mal diseñados (tanto de hardware como de software).

En el caso que se aborda se ha diseñado un set de cuatro pruebas donde se pondrán a prueba los algoritmos de marcha que se han programado. La primera es una prueba de desplazamiento sobre un terreno vacío, sin pendientes ni obstáculos; la segunda es una prueba de superación de una escalera; la tercera simula un terreno abrupto y la última es la superación de un plano inclinado.

Como la simulación en un ordenador se puede considerar una simulación en un entorno controlado y, por tanto, si siempre se realiza bajo las mismas condiciones, los resultados obtenidos serán idénticos, al principio de cada prueba el robot se verá afectado por una perturbación provocada adrede por el sistema. De esta forma se intenta exponer al robot a distintos casos en cada repetición de las pruebas.

Cada prueba se repetirá un total de 100 veces para tener una muestra amplia y poder obtener unos resultados más concluyentes. Además, en cada una se recogen una serie de datos para su análisis, éstos son: tiempo de la prueba, distancia recorrida, velocidad media, cuerpos/segundo, posición inicial (x,y), posición final (x,y) y altura media del centro del robot.

4.1. Prueba 1: Desplazamiento rectilíneo

El objetivo de la primera prueba es analizar si todos los modos de marcha son capaces de realizar un desplazamiento de por lo menos un cuerpo por segundo, lo que significaría que superan en esta habilidad a numerosos robots hexápodos ya construidos. A parte de esa cualidad, se pretende analizar cual es la velocidad máxima que es capaz de alcanzar cada modo, para lograrlo se irá aumentando sucesivamente la velocidad del robot hasta que sea incapaz de recorrer una distancia de X metros con un error en el eje transversal menor al diez por ciento de la distancia recorrida (figura 7). La duración de la prueba es de 60 segundos.

En el cuadro 1 se pueden observar los resultados obtenidos.

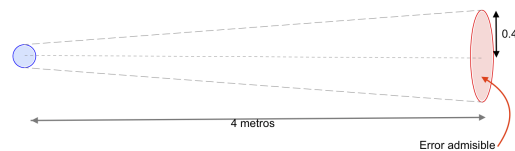


Figura 7: Error máximo permitido en la prueba 1.

Cuadro 1: Resultados de la primera prueba.

Modo	Distancia (m)	Velocidad (m/s)	Cuerpos	Pos. Final (x,y)	Altura media (m)
Trípode	4.5	0.075	2.16	-4.5;0.066	0.0971
Tetrápoda	7.53	0.125	3.62	6.95;-2.9	0.093
Onda	4.45	0.074	2.13	-0.05;4.45	0.088
Onda V2	5.57	0.093	2.68	5.46;1.12	0.088
Nuevo Modo 1	4.15	0.069	1.99	3.98;-1.19	0.085
Nuevo Modo 2	12.07	0.201	5.79	12.02;1.16	0.062

De la prueba número 1 se desprenden numerosos datos de interés, el primero se puede obtener del análisis de las velocidades experimentadas por el robot, el modo de marcha nuevo 1 ha triplicado en velocidad casi al resto de modos de marcha, el segundo que más velocidad media ha tenido es el modo de marcha que imita a los tetrápodos, pero muy por debajo. Aunque las velocidades puedan parecer bajas, son todo lo contrario, en robótica se considera excelente que un robot móvil pueda alcanzar una velocidad de un cuerpo por segundo. En el cuadro 2 se puede observar una comparación con el resto de robots diseñados hasta la fecha.

Cuadro 2: Comparativa de desplazamiento con otros robots.

Robot	Longitud (m)	Masa (kg)	Velocidad (m/s)	Cuerpos/segundo
CW Robot	0.5	1	0.0833	0.16
Dante II	3	770	0.017	0.006
Atila	0.36	2.5	0.03	0.083
ASV	5	3200	1.1	0.22
Boadicea	0.5	4.9	0.11	0.22
Sprawlita	0.17	0.27	0.42	2.5
Robot	0.48	9.5	12.07	5.79

En la figura 8 se puede observar las distintas trayectorias que ha realizado cada uno de los robots. Destaca, en color blanco, el recorrido del modo 3, realizando casi un medio giro, para intentar resolver este error cometido por el patrón programado se cambió la secuencia de movimiento de las patas (figura 9) y cuyo resultado se puede ver en color amarillo.

Otro dato que se desprende de los datos es que solo el modo en trípode alterna es capaz de mantener una marcha más o menos rectilínea, el resto de modos se ven afectados por los desequilibrios que se producen en algún punto de las transiciones al no encontrarse el centro de gravedad dentro del margen de estabilidad o por el desfase que se produce en el primer paso.

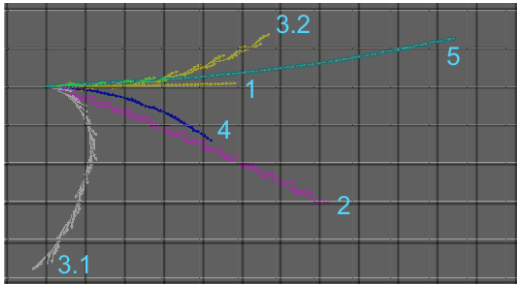


Figura 8: Trayectorias seguidas por los distintos modos de marcha.

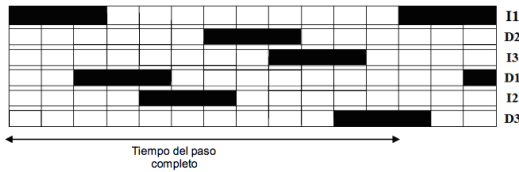


Figura 9: Nuevo modo de onda diseñado.

La comparación de la altura del centro de masas del robot también resulta interesante (figura 10). Se aprecia como algunos modos de marcha mantienen una altura más constante mientras que otros están constantemente subiendo y bajando, esto puede convertirse en un punto determinante a la hora de seleccionar el modo de marcha según la superficie donde se vaya a actuar.

4.2. Prueba 2: Superación de una escalera

La segunda prueba busca averiguar que tipos de marcha son capaces de superar una escalera. Esta prueba es una característica importantísima que debe tener el robot pues una de las principales limitaciones que tienen los robots USAR actuales es la incapacidad de subir escaleras, por tanto, lograr que el robot sea capaz de superar esta prueba se convierte en un objetivo esencial a superar.

La escalera diseñada para la prueba está diseñada según los estándares en arquitectura [2], donde se exige que la huella sea como mínimo de 28cm. y la contrahuella en el intervalo 13 a 18cm, cumpliendo la siguiente relación:

$$54 < 2 \cdot \text{contrahuella} + 1 \cdot \text{huella} < 70 \quad (3)$$

En el caso abordado, la contrahuella tiene una altura de 17cm y la huella 34cm, dando un resultado de 68cm (figura 11).

En este caso el modo nuevo 2 fue capaz de superar el obstáculo aunque con dificultades, el robot tenía que estar perpendicular al peldaño que iba a subir, en caso contrario no lo superaba y debía

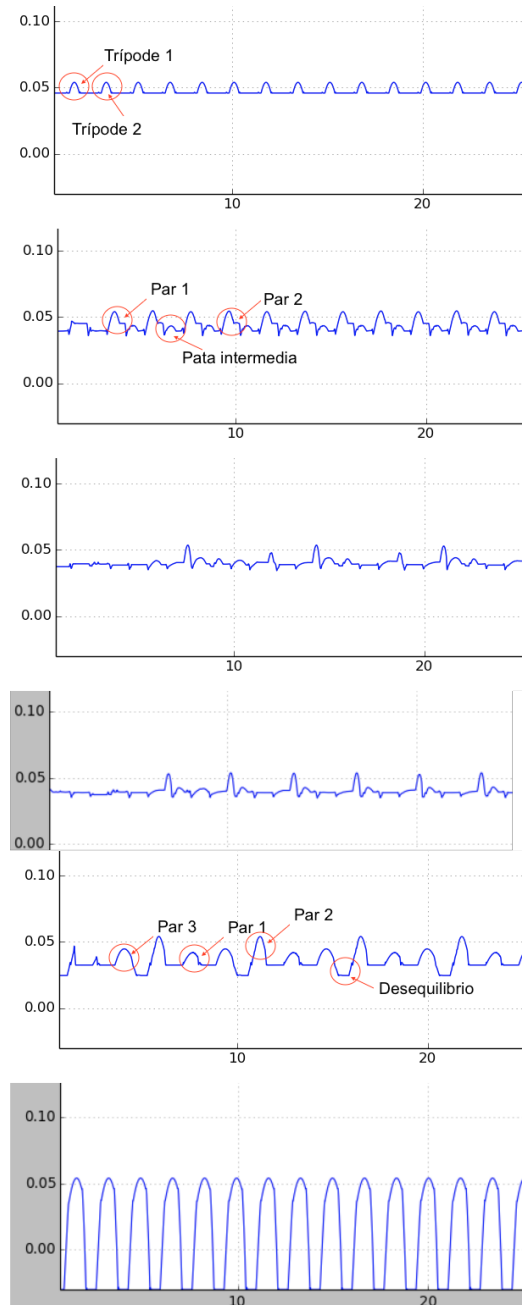


Figura 10: Altura del centro de masa en cada tipo de marcha.

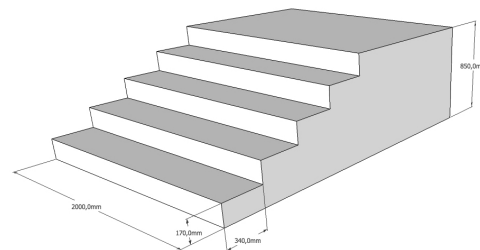


Figura 11: Modelado de la escalera para la prueba 2.

recolocarse, sin embargo, si no se producía ninguna desviación en la trayectoria es capaz de subir toda la escalera de una vez. También logró el objetivo el modo nuevo 1 pero siempre que estuviese colocado en la misma posición que el modo anterior y además, solo lo superó si el movimiento de las patas se realizaba par delantero. Los resultados de los dos modos que superaron la prueba se detallan en la figura 12, donde se aprecia que el modo nuevo 2 es mucho más rápido a pesar de presentar un mayor número de intentos para subir cada escalón. Por su parte, el modo nuevo 1 presenta esa lentitud debido a que en cada escalón que supera, tiene que esperar a que la secuencia de movimiento llegue de nuevo al par delantero.

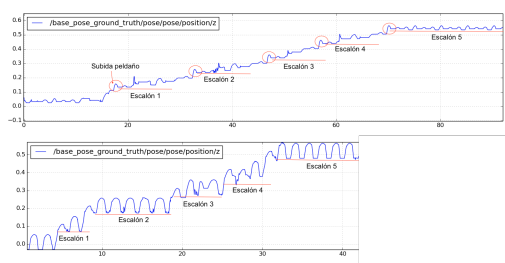


Figura 12: Resultados de la prueba 2.

Como el resto de modos de marcha seguían sin poder subir la escalera se decidió realizar un cambio en la estrategia de control, ya que uno de los motivos por los que no podían subir la escalera es la falta de par contra el escalón. Para ello, se rediseñó el algoritmo para que realizase un control de secuencias en intervalo de tiempo, el lado positivo de este control es que cuando una pata hiciese fuerza contra un escalón, transcurrido el intervalo de tiempo definido, entraría en acción la segunda pata delantera, ayudando a solventar el obstáculo. La consecuencia de emplear este modo de marcha es que se pierde la sincronización entre patas.

La conclusión de esta prueba indica claramente que la superación de obstáculos presenta dos factores claves, el primero es la relación entre el diámetro de la pata y el escalón, donde el segundo no puede ser mayor que el primero; y el segundo significa que el modo de marcha empleado debe de aplicar un par con las dos patas delanteras simultáneamente para poder superar el obstáculo.

4.3. Prueba 3: Navegación por terreno abrupto

Los robots USAR suelen ser diseñados para desplazarse en este tipo de terreno, pero como ya se analizó en el estado del arte, al final, un gran número son incapaces de superar este obstáculo. La prueba no trata de averiguar solo quien es capaz de superar el terreno abrupto sino también

realizarlo de una manera más rápida.

El terreno modelado para la prueba se observa en la figura 13 según el modo de marcha que se seleccione el robot seguirá la trayectoria según el par que pueda aplicar en cada secuencia y las posibles colisiones entre el terreno y el cuerpo (figura 14).

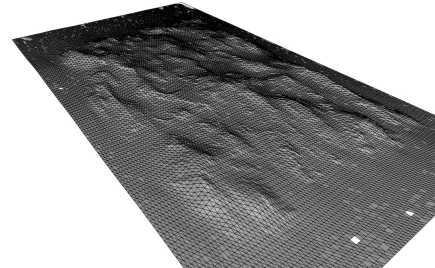


Figura 13: Modelado del terreno de la prueba 3.

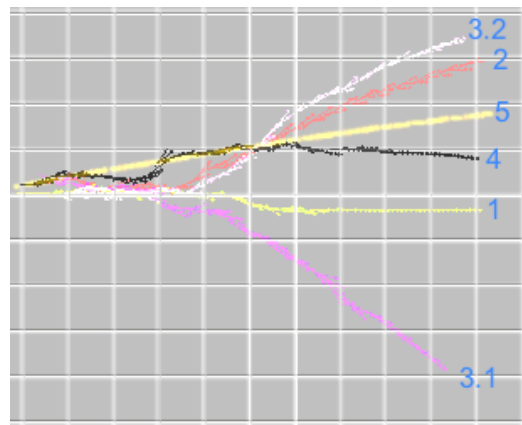


Figura 14: Resultados de la prueba 3.

Como se puede apreciar en los resultados de esta prueba, los modos de marcha de trípode alterno y el nuevo modo 1, son los que han seguido una trayectoria más rectilínea, esto se puede deber a dos factores principales, que tienen una altura media respecto al suelo superior a los demás modos, con lo que han podido superar obstáculos que los otros modos han debido de rodear. O, que las secuencias de movimiento son capaces de generar más par para superar los obstáculos.

Por último, en la figura 15 se puede apreciar el perfil de la ruta seguida por cada modo.

4.4. Prueba 4: Pendiente máxima

Resulta frecuente que tras los terremotos o derrumbes de edificios, se encuentren paredes derribadas pero formando planos inclinados, o bien que haya que acceder al interior de una vivienda a través del tejado, tal y como ocurre cuando hay deslizamientos de tierra que sepultan viviendas.

Esta prueba se ha diseñado para simular estas si-

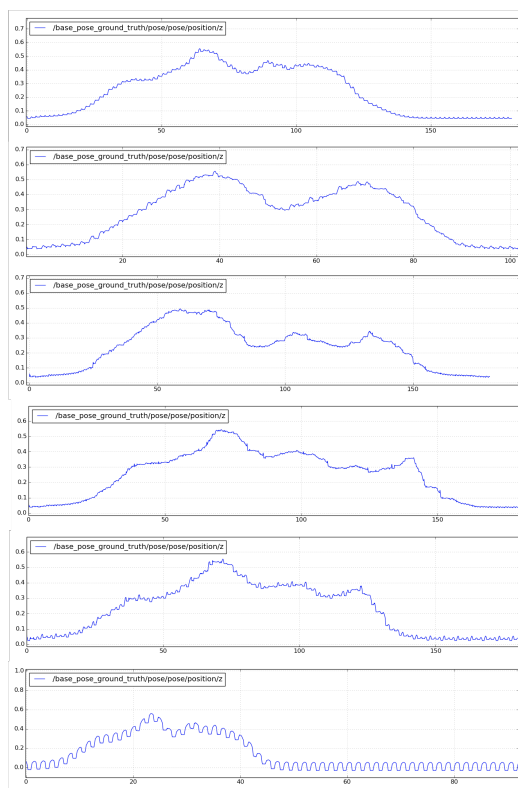


Figura 15: Perfil de la ruta seguido por cada modo de marcha en la prueba 3.

tuaciones y averiguar que secuencia de movimientos es capaz de superar un plano más inclinado. Se empezó probando a los robots con una pendiente constante del 10 % con una longitud de 4 metros en la proyección horizontal, para posteriormente ir aumentando la inclinación hasta alcanzar una pendiente máxima del 50 %. Los resultados obtenidos en esta prueba han sido muy satisfactorios, todos los robots han sido capaces de superarla sin ningún inconveniente. En la tabla 4.5 se muestran el tiempo empleado por cada modo en una pendiente del 50 %.

Cuadro 3: Resultados de superación de la prueba 4 para una pendiente del 50 %.

Modo	Tiempo (s)
Trípode Alterno	80
Tetrápodo	51
Onda	79
Modo Nuevo 1	71
Modo Nuevo 2	20

5. Conclusiones

Cabe resaltar los resultados obtenidos por los dos nuevos modos de marcha ideados, en especial el

segundo de ellos, modo nuevo 2. Quizás hasta la fecha nadie se había planteado analizarlo por la poca naturalidad del movimiento que realiza, incluso en este trabajo se dudó desde el principio de su eficacia. Sin embargo, mucho más allá de lo esperado, ha sido con creces el movimiento que más versatilidad ha ofrecido, siendo capaz de superar todas las pruebas casi sin inconvenientes.

También se ha observado que el trípode alterno es que es capaz de realizar unas trayectorias más rectilíneas y manteniendo una altura más constante, es por ello que es el que predomina en los seres vivos hexápodos.

Sería muy interesante el poder analizar un comportamiento mixto, que en terrenos donde los obstáculos sean fáciles de esquivar o con un tamaño menor a la mitad del diámetro de la pata se emplee el trípode alterno y cuando haya que superar un obstáculo elevado se cambie el modo de marcha al modo nuevo 1 o modo nuevo 2.

Queda, por tanto, demostrada la importancia del estudio realizado en este trabajo, abriendo nuevas vías de desarrollo a robots terrestres de rescate, donde se han superado los elementos que hasta la fecha han limitado a los robots que se desplazan mediante ruedas convencionales y orugas.

Agradecimientos

Esta investigación ha recibido fondos del proyecto RoboCity2030-III-CM (Robótica aplicada a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos. fase III; S2013/MIT-2748), financiado por los Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid y los Fondos Estructurales de la Unión Europea, y del proyecto DPI2014-56985-R (Protección robotizada de infraestructuras críticas), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España.

Referencias

- [1] R. Balasubramanian. Legless locomotion: Concept and analysis. Technical report, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania 15213, May 2004.
- [2] Gobierno de Espana.Codigo tecnico de la edificación. db-si. Technical report, Gobierno de Espana.
- [3] Juan Jesús Roldán Gómez, Mario Garzón Oviedo, Jorge de León Rivas, David Alfredo Garzón Ramos, Andrés Martín Barrio, Silvia Terrile, Pablo García Auñón, Jaime Del Cerro Giner, Claudio Rossi, and Antonio Barrientos Cruz. Proyecto pric: Protec-

- ción robotizada de infraestructuras críticas. In *Libro de actas de las Jornadas Nacionales de Robótica 2017*, volume 1, pages 1–6, Valencia, Junio 2017. CEA-IFAC. Robótica y Cibernética RobCib.
- [4] E. Z. Moore. Leg design and stair climbing control for the rhex robotic hexapod. Master's thesis, Department of Mechanical Engineering McGill University, January 2002.
 - [5] Robin R. Murphy. *Disaster Robotics*. The MIT Press, 2014.
 - [6] Chenghui Nie, Xavier Pacheco Corcho, and Matthew Spenko. Robots on the move: Versatility and complexity in mobile robot locomotion. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 20(4):72/82, December 2013.
 - [7] Jorge De Leon Rivas. Definición y análisis de los modos de marcha de un robot hexapodo para tareas de búsqueda y rescate. Master's thesis, Escuela Superior de Ingeniería Industrial. Universidad Politécnica de Madrid, October 2015.
 - [8] Jesus Tordesillas. Diseño y simulación del sistema de locomoción de un robot hexapodo para tareas de búsqueda y rescate. Master's thesis, Universidad Politécnica de Madrid, July 2016.
 - [9] Jesus Tordesillas, Jorge De Leon, Jaime Del Cerro, and Antonio Barrientos. Modelo cinemático de un robot con c-legs. *Jornadas de Automática*, pages 267–275, September 2016.

SISTEMA DE INTERACCIÓN VISUAL PARA UN ROBOT SOCIAL

Mario Domínguez López
Universidad de Valladolid, Escuela de Ingenierías Industriales.
Paseo del Cauce 59, 47011 Valladolid
ikermario@gmail.com

Samuel Marcos Pablos
Centro Tecnológico CARTIF. Parque Tecnológico de Boecillo, 205, 47151 Boecillo, Valladolid
sammar@cartif.es

Eduardo Zalama Casanova, Jaime Gómez García-Bermejo
Universidad de Valladolid, Escuela de Ingenierías Industriales, ITAP-DISA.
Paseo del Cauce 59, 47011 Valladolid
ezalama@eii.uva.es , jaigom@eii.uva.es

Resumen

Una de las características de los robots sociales es que tengan expresividad y fluidez lo más cercana a la naturaleza humana. En este caso una de las mayores fuentes de expresividad son los rasgos faciales. Por otra parte, estamos acostumbrados a comunicarnos mirando a otras personas a la cara por lo que desarrollar robots con expresividad, capacidad gestual y de seguimiento facial es una de las características buscadas en el desarrollo de robots sociales.

El presente artículo describe el desarrollo de un sistema de interacción hombre-máquina para un robot móvil social constituido por dos subsistemas o módulos. El primer subsistema se encarga de la detección del interlocutor y su seguimiento facial. Para ello realiza una detección inicial a partir de la información suministrada por el láser de navegación del robot, para posteriormente fijar la atención a partir de la información obtenida con una cámara de rango tipo Kinect. El segundo subsistema de encarga de la generación de gestos del robot. Para ello se ha adoptado el estándar FACS (Facial Action Coding System) lo cual permite su utilización en diferentes tipos de robots. La generación de expresiones se realiza mediante la combinación del movimiento controlado de cuello, párpados y ojos, con gestos mostrados en un display luminoso en la boca del robot.

Palabras clave: FACS, ROS, Interacción hombre-máquina, Robot social.

1 INTRODUCCIÓN

Un robot social es aquel que comunica e interactúa con las personas de forma sencilla y agradable siguiendo comportamientos, patrones y normas sociales. Para ello, además de tener apariencia humanoide, se necesita que disponga de habilidades que se enmarcan dentro del dominio de la llamada inteligencia social. Se debe tener en cuenta que la socialización con las personas es un tema difícil, ya que los robots y los humanos no comparten un lenguaje común ni perciben el mundo de la misma forma [12].

Según Dauthenhahn [3] los robots sociales son agentes personalizados que forman parte de un grupo heterogéneo. Para llevar a cabo estos objetivos un robot tiene que ser capaz de mostrar ciertas características: *personificación, emoción, diálogo, personalidad, percepción orientada a humanos, modelado del entorno, aprendizaje social, e intencionalidad*. Se considera muy importante que posean una interfaz natural con algún grado de representación antropomórfica tal como una cabeza (personificación), con la que pueda realizar expresiones faciales para comunicar estados de ánimo de manera gestual (emociones).

Por ello en los últimos años los investigadores han tratado de desarrollar robots con personificación, capacidad gestual y sistemas de percepción y control que faciliten la interacción con las personas.

La entidad corpórea y capacidad gestual de los robots facilita la interacción, al fin y al cabo desde siempre nos hemos comunicado con otras personas cara a cara. El aspecto del robot también ha sido discutido ampliamente desde que M. Mori [8] definió la regla

básica sobre la familiaridad y empatía en función de su grado de similaridad a las personas. Sin embargo, es necesario dotar a los robots de capacidades de interacción inspiradas en las de los humanos.

En este artículo se presenta el desarrollo de un sistema de seguimiento facial y de generación gestual para Sacarino, un robot desarrollado en Fundación Cartif. El artículo está organizado de la siguiente forma. En la sección 2 se describe Sacarino, el robot en el que se han implementado los sistemas de interacción descritos en este artículo. En la sección 3 se explica el sistema de seguimiento Facial. En la sección 4 se explica el sistema de generación gestual. En la sección 5 se aborda el sistema global de interacción para finalizar con las conclusiones en la sección 6.

2 EL ROBOT SACARINO II

En investigaciones precedentes nuestro grupo de investigación ha desarrollado el robot social Sacarino, integrado por una base móvil y un sistema de interacción antropomorfo [8, 11]. El robot ha sido probado de forma intensiva en un entorno hotelero, durante largos periodos de tiempo.

Fruto de esta experimentación se ha abordado el desarrollo de un nuevo robot, Sacarino II (Figura 2). Este robot tiene como finalidad ofrecer servicio en un hogar con personas mayores, donde desempeñará funciones de acompañamiento, juegos, actividades físicas, información, apoyo a terapia etc. El nuevo robot es más ligero y estilizado que la versión precedente, tiene tracción diferencial y en él se ha integrado una Tablet Android que permite utilizar multitud de aplicaciones y servicios de Google Play, en particular el servicio de reconocimiento de voz de Google. Además, este elemento sirve para apoyar la comunicación oral cuando el reconocimiento de voz y la gestión de diálogo se ven comprometidos, especialmente en ambientes ruidosos y poco estructurados.



Figura 2. Robot Sacarino II

La Figura 3 se muestra la estructura básica de la cabeza del robot, que es su elemento fundamental de interacción. Además, para facilitar la percepción del entorno y de los usuarios se ha incluido un sensor Kinect en la parte superior de dicha cabeza, que se complementa con el láser de navegación situado en la base del robot.

El presente trabajo se centra en dos aspectos específicos de la interacción usuario-robot: que la cabeza siga al interlocutor con la mirada y que sea capaz de generar un conjunto de expresiones emocionales básicas.

A partir de una primera detección del usuario mediante un sensor de visión 2D como es el láser SICK, el robot en modo de funcionamiento de seguimiento, pasará a realizar un seguimiento facial del usuario mediante Microsoft Kinect. La principal novedad aquí es el diseño de una función de filtrado tal, que consigue transiciones suaves y fluidas en el movimiento facial, lo que provoca un impacto positivo sobre la interacción del robot con las personas.

Por su parte, en la generación de emociones resulta novedosa la adopción del estándar FACS (*Facial Action Coding System*), que permite la formulación generalista de expresiones y gestos faciales, reforzando la interacción usuario-robot.

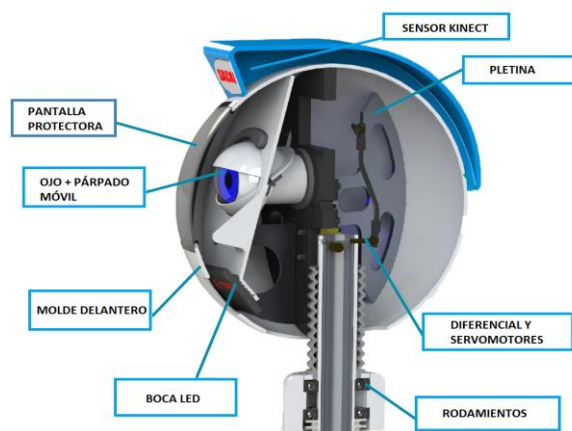


Figura 3: Detalle de la cabeza de Sacarino II

La cabeza integra seis servomotores controlados por el driver SCS32. Tres de estos motores se encargan de gestionar los grados de libertad del cuello y el resto se destinan al movimiento de párpados y cejas. Además, Sacarino II cuenta con una pantalla de matriz de leds como boca, que le permite acompañar los diferentes gestos de cabeza, cejas y párpados con muecas labiales, dotando a así a la cara de una mayor expresividad.

Tanto el sistema de seguimiento facial como el de generación de gestos se han desarrollado sobre *Robot Operating System*, ROS [7]. Se trata de un sistema

operativo de código abierto (Open source) que cuenta con una comunidad desarrolladora muy extensa y facilita la programación modular basada en componentes, y abstracción hardware.

3 MÓDULO DE SEGUIMIENTO FACIAL

Para establecer una interacción satisfactoria el robot tiene que cumplir una serie de normas básicas de actuación cuando se encuentra ante un humano. En concreto, una de las reglas básicas de comportamiento es mirar a la persona que se tiene delante. El presente apartado aborda este aspecto.

3.1 OBTENCIÓN E INTERPRETACIÓN DE DATOS

Como elementos sensores para realizar el seguimiento del usuario se ha optado por combinar el sensor Microsoft Kinect situado en la cabeza del robot, con el láser SICK situado en la base móvil. Este último proyecta un haz de luz en un arco de 270° y es utilizado también durante la navegación del robot por el entorno.

Para tratar los datos que ofrece Kinect se han seleccionado las librerías OpenNi, disponibles en ROS, que procesan la información suministrada por el sensor de Kinect a formatos que pueden ser utilizados para el trabajo a alto nivel.

En concreto, la librería OpenNi_Tracker [10] es un nodo ROS que, mediante técnicas de tratamiento de imagen (segmentación y esqueletización) en conjunto con la nube de puntos, es capaz de situar sistemas de referencia en las articulaciones de un usuario que se encuentre dentro del campo visual de Kinect. Esto se logra a partir de una serie de matrices de transformación, denominadas *Transformed Frames*.

Por su parte, el láser de la base se utiliza en la detección de las piernas de los usuarios. En primer lugar, un nodo ROS llamado *leg_detector* [9], se encarga de, mediante un algoritmo probabilista, encontrar posibles conjuntos de puntos (*clusters*) que puedan tener la morfología de piernas humanas. Seguidamente, refiere cada uno de los puntos a un sistema de referencia situado en el propio láser mediante los ya comentados *Transformed Frames*.

Finalmente, este nodo ofrece como salida un vector de posibles personas detectadas.

3.2 ALGORITMO DE SEGUIMIENTO CON KINECT

Para lograr el objetivo de que el robot dirija la mirada hacia el usuario, los ángulos (panorámico y cabeceo)

que forman la orientación de referencia de la cabeza del usuario, respecto del de Kinect, deben ser llevados a 0 por el sistema de control.

Para el control de movimiento de la cabeza y resto de elementos (párpados y cejas) se utiliza un conjunto de servomotores y la tarjeta controladora SSC32 de Lynxmotion [13], capaz de controlar hasta 32 servomotores mediante un microcontrolador Atmel Atmega168 de 14.74MHz.

Uno de los problemas importantes a la hora de hacer seguimiento, es que los movimientos de la cabeza sean suaves evitando oscilaciones al alcanzar la posición de referencia para lo que se ha introducido un controlador no lineal con zona muerta y saturación mediante una expresión sigmoide. La expresión viene dada por:

$$f(e) = \text{sgn}(e) \cdot \frac{e_{\max}}{1 + e^{-(2e - e_{\max})}} \quad (1)$$

donde e es el error, $\text{sgn}(e)$ es la función signo que da un valor +1 o -1 dependiendo de si el error es mayor o menor que cero y e_{\max} es el error máximo admisible.

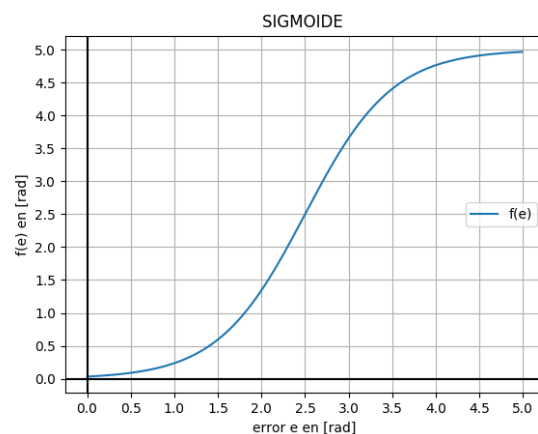


Figura 5. Función sigmoide definida en ecuación (1).

La sigmoide limita la acción de control para valores grandes del error y la limita ante errores pequeños. Esto último permite restringir el movimiento ante pequeños desplazamientos del usuario, evitando oscilaciones.

La referencia de velocidad que se envía a la tarjeta controladora es la máxima admitida para cada servomotor pues la tarjeta controladora se encarga de generar los perfiles de aceleración y deceleración.

3.3 ESTRATEGIA DE SEGUIMIENTO CON EL LÁSER SICK

El láser SICK se utiliza para obtener la posición de un usuario en función de la detección de pares de

piernas, para, tras esto, hacer un seguimiento del usuario con la cabeza del robot, restringido al plano panorámico o de guiñada (primer grado de libertad).

Como se introducía en (3.1), la salida tras los nodos de tratamiento e identificación de pares de piernas devuelve un vector de posibles personas detectadas (punto medio entre dos piernas candidatas). Cada uno de los objetos persona en el vector, tiene un campo llamado fiabilidad (*reliability*), que se mueve en un intervalo de 0 a 1 y da muestra de cuán seguro es que verdaderamente se trate de una persona real (no de ruido u otros objetos).

La estrategia seguida comienza por ordenar este vector de mayor a menor fiabilidad, escogiendo como valor inicial el primer elemento.

A continuación, se compara un umbral para evitar hacer seguimiento a elementos ruidosos, con perturbaciones u objetos. Para ello se ha fijado un umbral de 0.2 (20%).

A partir de este momento, el sistema de control toma nota del número de identificador de esa persona, y, en cada iteración la busca por dicho identificador, con el fin de realizar un seguimiento estable de la misma incluso en presencia de otras personas.

Las únicas dos condiciones que se pueden dar para que el robot cambie de persona a la que hace el seguimiento son las siguientes:

1. Que la persona salga del rango de alcance del láser, en cuyo caso, volveremos a tomar del vector de entrada, la persona que tenga la fiabilidad más alta.
2. Que la persona seguida actualmente permanezca estática y que, a su vez, otra persona varíe su posición de manera significativa, en cuyo caso se pasará a seguir a esta última.

Con objeto de enviar la referencia angular a la controladora y, por tanto, al servomotor de movimiento panorámico del cuello, se calcula el ángulo que forman el punto medio del par de piernas y el sistema de referencia láser mediante:

$$\theta = \arctan \frac{y}{x} \quad (2)$$

donde x e y corresponden al punto medio del par de piernas seleccionado.

4 MÓDULO DE EXPRESIÓN GESTUAL

Otro de los ingredientes que se ponen en juego en toda interacción humana son todas aquellas acciones

que tienen que ver con la comunicación no verbal, es decir, con el complejo sistema de gestos.

El saber interpretar qué movimientos dan lugar a ciertas emociones no es tarea fácil. Se trata de un campo de estudio bastante amplio y que comprende varias disciplinas, no solamente técnicas, sino que incumben a la medicina o psicología, por ejemplo.

De hecho, el primero en formular el problema en forma de clasificación fue el psicólogo Paul Ekman en los años 70 [6]. Propuso un estándar muy utilizado en la actualidad conocido como estándar FACS (*Facial Action Coding System*) que asigna una determinada emoción a un conjunto concreto de músculos faciales, cada uno activado a un determinado nivel de intensidad.

La unidad básica del sistema FACS es la unidad de acción, o *Action Unit* (UA). Una UA representa las actividades musculares que producen cambios momentáneos en las apariencias faciales. Dicho de otra manera, una unidad de acción es un código numérico para describir los movimientos de los músculos faciales.

Tabla 1: Codificación de unidades de acción en Sacarino II basada en FACS

Identificador	Descripción
2	Levantamiento exterior de cejas.
3	Bajar cejas.
45	Bajar párpados.
M45	Levantamiento de párpados.
46	Guiño ojo izquierdo.
M46	Guiño ojo derecho.
47	Apertura de ojos.
51	Movimiento cuello izquierda.
52	Movimiento cuello derecha.
53	Alzar cuello.
54	Bajar cuello.
57	Inclinar cabeza izquierda
58	Inclinar cabeza derecha

La relación entre las AU y los músculos faciales no es necesariamente 1-a-1; algunas UA se componen de más de un músculo y otras UA se basan en describir movimientos separados del mismo músculo.

El acto de describir movimientos faciales utilizando el sistema de codificación facial se llama FACS de codificación. Códigos múltiples FACS se notan usando más (+). Por ejemplo 1 + 2 representa elevar las partes interior y exterior de la ceja (es decir, elevar toda la ceja).

El FACS también incluye un sistema para describir la intensidad de cada AU mediante la colocación de una letra de A a E después del código numérico, pero

antes del signo más. El rango de intensidad para cada letra es:

- Rastro (A)
- Leve (B)
- Marcado / Pronunciado (C)
- Severo (D)
- Extremo / Máximo (E)

Para continuar con el ejemplo anterior, $1E + 2E$ representa la elevación extrema (o máxima) de las porciones interior y exterior de las cejas.

Pongamos un caso real que se puede dar en el robot, sea el gesto “sorpresa” el que tiene que expresar Sacarino II. Las unidades de acción que se deben activar serían la 1 con intensidad E (Levantar las cejas al máximo), levantamiento labio superior (unidad de acción 10) a intensidad severa D, levantar párpado superior 5 también con intensidad D y por último alzar la cabeza (53) con intensidad marcada, C. Es decir:

$$\text{Sorpresa} = 1E + 10D + 5D + 53C \quad (3)$$

En Sacarino II se han implementado las unidades de acción expuestas en la Tabla 1 y cuya combinación da lugar a las seis emociones básicas además de la expresión neutra, que son: tristeza, asco, miedo, alegría, enfado, sorpresa.

4.1 IMPLANTACIÓN

Para llevar a cabo este subsistema de expresiones en el robot, se ha optado por una estructura modular, que aprovecha el potencial de ROS en este aspecto, tal como ya ha sido comentado. Esto significa que se ha seguido una programación jerárquica en la que cada nivel inferior proporciona una serie de servicios al nivel superior, y este no se debe preocupar de cómo lo lleva a cabo.

4.1.1 Servidor de acciones

Cada gesto es una combinación de unidades de acción y, a su vez, cada unidad de acción se concreta en el movimiento de ciertos servomotores.

Este nodo ROS se encarga de recibir como entrada las unidades de acción que le llegan del cliente (nivel 2) y traducirlas en movimiento de servomotores, lo cual significa dar el identificador del servomotor, y su posición y velocidad. Una vez realizado este cálculo, publica un vector con la cadena de servomotores, especificando para cada uno posición y velocidad, al servicio de la controladora para que esta mueva los servomotores.

4.1.2 Cliente de acciones

Se encuentra en el nivel 2 de la arquitectura. Siguiendo un paradigma cliente-servidor este nodo se comunica con el servidor de acciones.

Recibe como entrada la expresión que se desea realizar, para, seguidamente, hacer la correspondencia entre el gesto y las unidades de acción, intensidad y velocidad que le corresponden. Una vez termina, ofrece como salida un vector con la estructura expuesta en la ecuación (3) y que sirve como entrada del servidor de acciones.

La arquitectura de los subsistemas de seguimiento y de expresión gestual se muestran en la Figura 6.

A continuación, se hablará de la última capa en la arquitectura que sincroniza ambos módulos según ordene la entidad que gobierna el robot entero, el secuenciador.

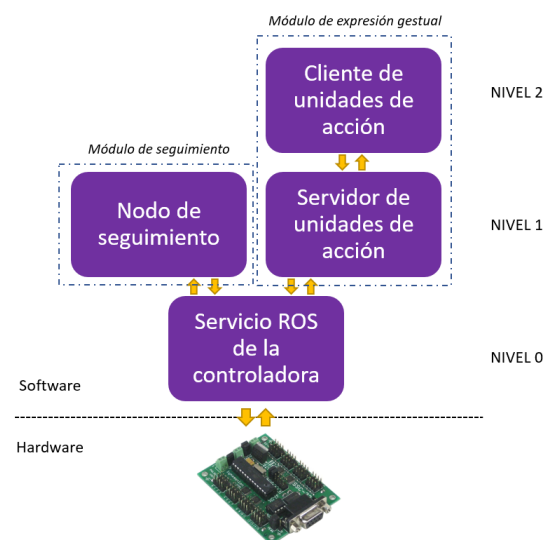


Figura 6: Arquitectura de los subsistemas

5 SISTEMA GLOBAL DE INTERACCIÓN

Con objeto de unificar los subsistemas vistos hasta ahora se ha aprovechado una herramienta potente incluida en ROS, como es la librería de acciones (“actionlib”).

En definitiva, lo que se persigue es una última capa superior en la arquitectura que sirva de interfaz entre todo el sistema de interacción y el secuenciador del robot. La librería de acciones parte del paradigma cliente-servidor pero incluyendo nuevos matices.

Básicamente, este nuevo modelo de comunicación permite que el cliente reciba información del estado de su petición en tiempo real (“feedback”), en lo que

espera el resultado final del servidor. Además, ahora es posible, por parte del cliente, cancelar las peticiones que hace al servidor en tiempo real.

Hemos definido una serie de comandos de alto nivel, que van a ir siendo modificados por el secuenciador:

- Modo de seguimiento
- Modo interacción
- Modo descanso

De esta manera, el secuenciador de programa irá ordenando el cambio de modo de acuerdo a estímulos externos.

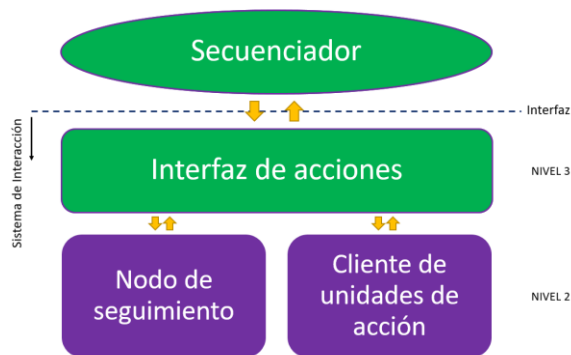


Figura 7: Nivel superior de la arquitectura

Cuando el robot se encuentre en modo seguimiento, solamente se centrará en reconocer y dirigir la mirada a un usuario que pase por las proximidades. Por tanto, no realizará ningún gesto. Sin embargo, cuando se encuentre en modo interacción, el robot, además de hacer seguimiento horizontal al usuario, ejecutará los gestos consignados por el secuenciador. Finalmente se encuentra el modo reposo en el que ambos subsistemas estarían inactivos.

Queda justificado, por tanto, el uso de un nivel superior en la arquitectura que controle ambos subsistemas.

5.1 DESARROLLO

Toda la implementación de la interfaz de acciones está concentrada en el nodo que recibe el mismo nombre (Figura 7).

El servidor de acciones toma como entrada un objetivo ordenado por el cliente (en nuestro caso el secuenciador), por ejemplo: “*Modo interacción y expresión tristeza*”. Entonces, el servidor cambia su estado a “Procesando” y, mientras el cambio de modo y la realización del gesto se está llevando a cabo, el secuenciador irá recibiendo información sobre el estado de la orden. Esto último se hace mediante porcentaje, donde un 0% corresponde a “aún no iniciado” y, a medida que transcurre el tiempo, el porcentaje progresará hasta el 100% que significará que se ha cambiado el modo y el gesto ha

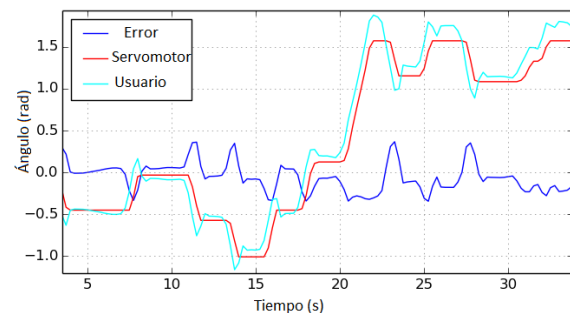
sido ejecutado, si todo ha transcurrido correctamente. Si es así, el servidor cambia su estado a “liberado” y queda a la espera de recibir nuevas órdenes.

6 RESULTADOS OBTENIDOS

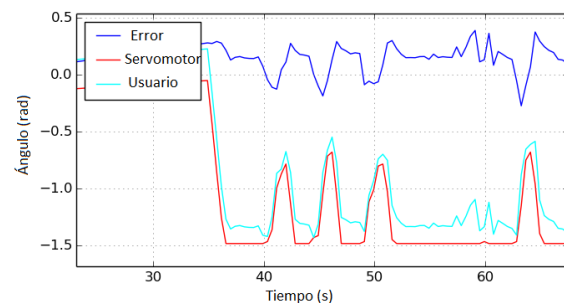
En esta sección se van a exponer los resultados obtenidos en los subsistemas desarrollados.

Para analizar el sistema de seguimiento con Kinect se muestra la evolución del error respecto al tiempo, así como la evolución de la referencia y el ángulo del servomotor.

Como se puede observar en la Figura 8, se han diseñado una serie de experimentos en forma de cambios en la posición del usuario bruscos (escalón) y progresivos (rampa).



(a) Evolución temporal en el plano guiñada



(b) Evolución temporal en el plano de cabeceo

Figura 8: Respuestas temporales del sistema de seguimiento

La respuesta de los servomotores es rápida y sobreamortiguada, con un retardo menor de 0.15 s. Además, se puede apreciar que, aunque la referencia oscile en algunos casos, los esfuerzos de control no comienzan a ser apreciables hasta que no se produzcan cambios más significativos, de acuerdo al tratamiento no lineal que se le ha dado al error.

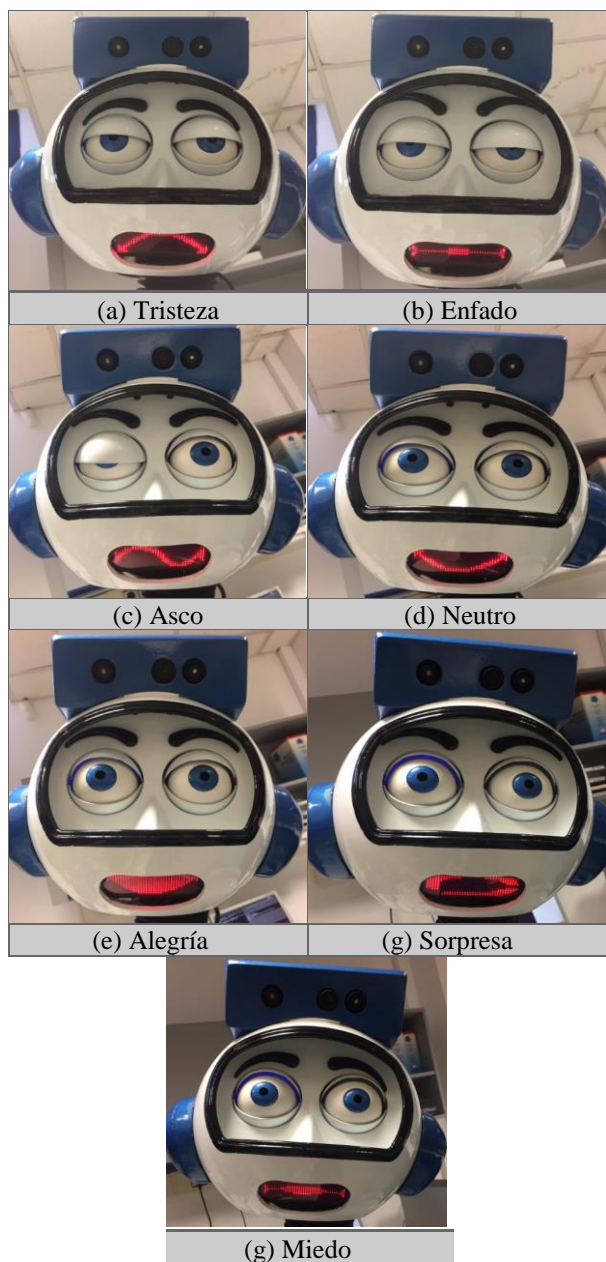
Por su parte, el error de posicionamiento se mantiene en una banda de 0 ± 0.1 rad en el estacionario. Dicha banda se produce porque para errores pequeños la

salida de la función sigmoide es aproximadamente cero, por lo que no se excita a la señal de control.

Esto último es beneficioso, puesto que la cabeza del robot no está continuamente reacomodándose una vez está centrada en el usuario. De lo contrario, el servomotor se podría quedar oscilando en torno a la posición final y producir un efecto negativo en la interacción.

Para finalizar este apartado, se muestran los resultados obtenidos en el subsistema de expresión gestual (Tabla II).

Tabla 2: Expresión gestual de Sacarino II



7 CONCLUSIONES

El objetivo fijado era el de dotar al robot Sacarino II de una mayor expresividad, para lograr un mejor impacto en la interacción hombre máquina.

Los estándares de comportamiento social dictan que es importante, a la hora de tratar con una persona, mirarla a los ojos, signo de estar activo en la conversación; y por otra parte, la gesticulación y expresividad facial acentúan el acercamiento y lo hacen más humano, reforzando positivamente la interacción. Para abordar este objetivo se ha propuesto un sistema de interacción basado en dos módulos.

Se ha desarrollado un primer módulo de detección de usuarios mediante un láser SICK. Una vez seleccionado uno de los usuarios se realiza su seguimiento visual mediante sensor Kinect integrado en la propia cabeza. Este seguimiento realiza de forma suave evitando oscilaciones mediante la inclusión de un controlador no lineal sigmoidal.

Los experimentos han demostrado un comportamiento natural en el seguimiento de usuarios.

Por otra parte, el subsistema de expresión gestual basado en FACS, proporciona al robot una gran expresividad, y una experiencia que resulta agradable para el usuario.

Para coordinar estos dos subsistemas, la biblioteca *actionlib* de ROS se ha mostrado como una herramienta muy útil a la hora de proporcionar al secuenciador del robot una realimentación en tiempo real de las órdenes que éste envía al sistema de interacción.

A partir del desarrollo propuesto en este proyecto y como líneas futuras de desarrollo se propone por un lado, la posible incorporación de un sistema de detección de expresiones emocionales del usuario así como sistemas adicionales de interacción.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, proyecto de investigación fundamental DPI2014-56500.

Bibliografía

- [1] A. J. Sánchez, «Desarrollo de un sistema de visión-3D para su integración en un robot móvil social,» 2014

- [2] D. C. L. Matovelle, «Diseño y Construcción de una cabeza mecatrónica de aspecto realista,» 2013. 2017 05 19].
- [3] Dautenhahn, K., Nehaniv, C. L. (1999). “Embodiment and interaction in socially intelligent lifelike agents. In *Computation for Metaphors, Analogy and Agent*”, Ed., LNAI 1562, pp. 102-142. Springer
- [4] Eduardo Zalama Casanova; Jaime Gómez García-Bermejo; Samuel Marcos; Salvador Domínguez; Raúl Feliz; Roberto Pinillos. Sacarino, a service robot in a hotel environment. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 253, pp. 1 - 14. Madrid. Springer (USA). ISSN 2194-5357. (2013)
- [5] Joaquin Lopez, Diego Perez, Eduardo Zalama and Jaime Gomez-Garcia-Bermejo. BellBot - A Hotel Assistant System Using Mobile Robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vedran Kordic, Aleksandar Lazinica, Munir Merdan (Ed.) 2013. InTech. ISBN: 1729-8806. (2013)
- [6] P. Ekman and W. Friesen. *Facial Action Coding System: A Technique for the Measurement of Facial Movement*. Consulting Psychologists Press, Palo Alto, 1978.
- [7] «Página oficial de ROS,» [En línea]. Available: <http://wiki.ros.org/>.
- [8] R. Pinillos, «Diseño de un robot social y validación de servicios en entornos hoteleros,». Trabajo Fin de Master. Universidad de Valladolid. 2014.
- [9] «Repositorio oficial de ROS,» [En línea]. Available: http://wiki.ros.org/leg_detector
- [10] «Repositorio oficial de ROS,» [En línea]. Available: http://wiki.ros.org/openni_tracker
- [11] Roberto Pinillos, Samuel Marcos, Raul Feliz, Eduardo Zalama, Jaime Gómez-García-Bermejo. «Long-Term Assessment of a Service Robot in a Hotel Environment». *Robotics and Autonomous System*. ISSN: 0921-8890. DOI: 10.1016/j.robot.2016.01.014 (2016).
- [12] S. Moriello, «Robots sociales, la nueva generación.,» 2008. [En línea]. Available: http://www.tendencias21.net/Robots-sociales-la-nueva-generacion_a2833.html. [Último acceso:
- [13] SSC-32 Servo Controller Driver. Lynxmotion. <http://www.lynxmotion.com/p-395-ssc-32-servo-controller.aspx>

Mejora del Comportamiento Proxémico de un Robot Autónomo mediante Motores de Inteligencia Artificial Desarrollados para Plataformas de Videojuegos

David Fernández, Javier Monroy, Javier Gonzalez-Jimenez

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Instituto de Investigación Biomédica de Málaga, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos, 29071, Málaga.
davfercha@uma.es, jgmonroy@uma.es, javiergonzalez@uma.es

Resumen

Este artículo presenta una arquitectura software que permite mejorar las capacidades sociales de robots móviles mediante el uso de motores de inteligencia artificial propios de las plataformas de desarrollo de videojuegos. La arquitectura propuesta se basa en fusionar el ampliamente utilizado Robotic Operating System (ROS) con los avanzados motores de inteligencia artificial de la plataforma de videojuegos Unity 3D. Esta fusión permite integrar comportamientos de alto nivel en la interacción hombre-robot, con los avanzados sistemas de gestión de la incertidumbre propios de arquitecturas puramente robóticas. Como caso práctico presentamos la planificación de trayectorias de un robot móvil en un entorno con presencia humana, detallando tres situaciones típicas de la interacción hombre-robot: esquivar a un humano que afecta en su trayectoria, aproximarse a una persona para establecer un diálogo, y evitar cruzar entre dos personas que están dialogando. Para cada situación, analizamos el entorno desde un punto de vista proxémico, y comparamos la trayectoria generada por el navegador de Unity 3D usando nuestra propuesta con una puramente robótica.

Palabras clave: Habilidades Sociales, Videojuegos, Unity 3D, HRI, Robot

1 Introducción

El envejecimiento de la población en los países desarrollados se ha convertido en un problema importante con una creciente atención por parte de la comunidad científica. Más allá de su dimensión estrictamente demográfica, el envejecimiento preocupa por sus efectos políticos, económicos y sociales [13]. En relación con este último, diversas iniciativas han surgido en los últimos años proponiendo el uso de plataformas robóticas para llevar a cabo actividades de carácter social, por ejemplo, como guías turísticos, asesores personales, o robots educativos.

No obstante, en la actualidad, la presencia real de

robots en entornos humanos está aún muy limitada, siendo una de las principales causas la altamente compleja interacción entre el hombre y el robot (HRI, de sus siglas en inglés) [3, 7]. Conseguir que un robot tenga un comportamiento que le permita ser aceptado en entornos sociales es un problema muy complejo y que abarca multitud de facetas. Una de estas es la proxémica [4] o estudio de la organización del espacio en la comunicación entre las personas y los objetos. Para el caso de interacción con robots móviles, diversos trabajos han sido propuestos [12, 11], donde la proxémica juega un papel fundamental a la hora de controlar los movimientos del robot. No obstante, aún existen grandes posibilidades de investigación en este ámbito, especialmente atendiendo a la gran variedad de situaciones en las que un robot puede interactuar con un humano [6, 9].

Una de las áreas que más ha avanzado en esta interacción maquina-humano en los últimos años es la relacionada con la industria de los videojuegos. Gracias al potente motor económico que la sustenta, gran variedad de algoritmos y motores de inteligencia artificial (IA) enfocados a la interacción con el humano han sido desarrollados y están disponibles de forma libre, especialmente a través de plataformas de desarrollo de videojuegos. En este campo, los motores de IA se utilizan principalmente para modelar el comportamiento de personajes no jugadores (NPC, de sus siglas en inglés) de forma que sus acciones y movimientos se asemejen a las de un humano cuando interactúan con el jugador, por ejemplo, respetando las distancias proxémicas durante un dialogo [10].

En este trabajo proponemos explotar el activo y avanzado desarrollo de los motores de IA de las plataformas de creación de videojuegos, aplicándolos al campo de la robótica móvil, especialmente en el contexto HRI. Más concretamente, proponemos una arquitectura software capaz de fusionar la potencia de los motores de IA de los entornos de videojuegos, con la robustez de los sistemas robóticos a la hora de gestionar la incertidumbre al interactuar en el entorno. Para validar nuestra propuesta, presentamos un caso práctico: la planificación de la trayectoria de un

robot atendiendo a las distancias proxémicas y a los humanos presentes en el entorno, y su posterior navegación.

2 Arquitectura software

Esta sección describe la arquitectura propuesta, presentando de forma genérica los diferentes componentes y su interconexión. Posteriormente, para el caso de uso propuesto, se detalla la estructura del planificador de trayectorias empleado y cómo este es extendido para integrar restricciones de tipo proxémico.

La Fig. 1 muestra la arquitectura global propuesta en este artículo, donde se aprecia que como arquitectura robótica se ha usado ROS¹ (Robot Operating System) por ser la más utilizada en la actualidad. ROS es un framework de código abierto y flexible que permite el desarrollo de software robótico. Consiste en una colección de herramientas, bibliotecas y convenciones que tienen como objetivo simplificar la tarea de crear un comportamiento robótico complejo y robusto. Por otro lado, como software de desarrollo de videojuegos, se ha escogido Unity 3D², un motor gráfico multiplataforma que permite la creación de juegos en 2D y 3D. Entre los diversos frameworks actuales de desarrollo de videojuegos se ha elegido éste por su versatilidad y por la amplia variedad de paquetes software ya existentes e integrables, los cuales permiten agilizar el desarrollo de proyectos explotando alternativas de forma rápida.

Dado que ambas plataformas software están diseñadas para funcionar sobre sistemas operativos distintos (ROS está solo disponible para sistemas operativos Linux, mientras que Unity 3D está basado en Windows), se hace necesario establecer un canal de comunicación bidireccional e independiente del sistema operativo anfitrión. En este trabajo proponemos emplear web-sockets, una tecnología que proporciona un canal de comunicación bidireccional y full-duplex sobre un único socket TCP. Esta tecnología, ampliamente usada por los navegadores y servidores web, así como en otros trabajos donde el sistema operativo ROS es conectado con plataformas de realidad virtual [5, 2], nos permite eliminar la dependencia del sistema operativo. No obstante, dado que los mensajes transmitidos pueden verse influenciados por las condiciones de la red de comunicaciones (pudiendo generar latencias no deseadas que influyan en el comportamiento del robot), se recomienda trabajar en conexión local y verificar que la frecuencia de transmisión de datos entre ambos sistemas es

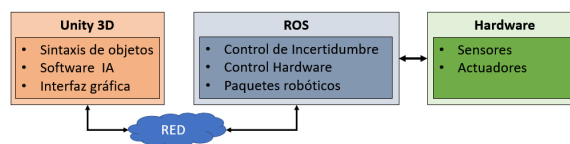


Figura 1: Diagrama representativo de la arquitectura global propuesta.

adecuada para la aplicación a ejecutar.

Concretamente, para realizar la conexión por web-sockets en ROS se ha utilizado *rosbridge_suite*³ que es un paquete instalable que permite el realizar comunicaciones web por socket mediante mensajes JSON. Para poder comunicarse correctamente, ha sido necesario realizar una adaptación de la estructura de los mensajes que usa ROS para que Unity 3D sea capaz de procesarlos, para ello se ha usado la librería *ROSBridgeLib*⁴ la cual posee las clases de los mensajes básicos de ROS.

Finalmente, se ha de comentar que a diferencia de Unity 3D, la plataforma ROS se basa en una arquitectura de comunicación P2P en la que diferentes "paquetes" intercambian información a través de una jerarquía de mensajes denominados "topics". Esta diferencia requiere extender la librería *ROSBridgeLib* para poder establecer una comunicación completa entre ambas plataformas.

2.1 Estructura del Planificador de Trayectorias

De entre las diversas tareas en las que los motores de IA de las plataformas de videojuegos pueden ser usadas para mejorar la interacción HRI, en esta sección nos centramos en la descripción de un planificador de trayectorias que permita al robot desplazarse e interactuar en un entorno con presencia humana.

Nuestra arquitectura está basada en ROS, donde los planificadores de trayectorias se dividen en dos fases o etapas: en primer lugar, un planificador global, el cual se encarga de generar caminos óptimos entre la posición actual del robot y el objetivo al que se desea llegar atendiendo a los obstáculos estáticos del entorno (generalmente en forma de mapa de ocupación), y a las restricciones de movimiento del robot. En segundo lugar, un planificador local que genera las consignas de velocidad, para mediante pequeños desplazamientos, seguir el trazado obtenido por el planificador global. El planificador local integra el comportamiento reactivo del robot puesto que su misión es completar la trayectoria global, evitando

¹<http://www.ros.org/>

²<https://unity3d.com/es>

³http://wiki.ros.org/rosbridge_suite

⁴<https://github.com/michaeljenkin/unityros>

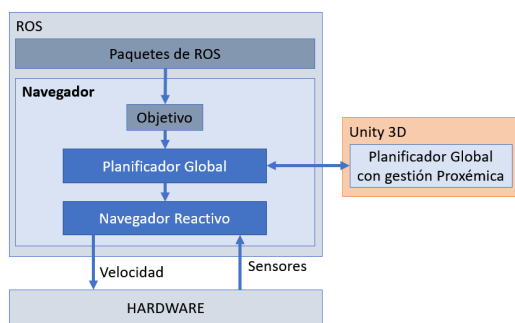


Figura 2: Diagrama representativo de la arquitectura propuesta para el planificador global.

los obstáculos que no se encuentren en el mapa de navegación, mayormente, obstáculos dinámicos (p.e. personas u otros robots).

Ambos planificadores se encuentran definidos en el paquete *move_base*⁵, ofreciendo una API para la configuración del algoritmo de generación de trayectorias a emplear en cada fase, así como los parámetros que determinan su comportamiento. Una de las ventajas de este paquete ROS es la posibilidad de definir nuevos planificadores personalizados a través de un sistema modular basado en plugins. Concretamente, explotamos esta propiedad para implementar un nuevo planificador que delegue en Unity 3D la generación de la trayectoria global, para luego ser procesada por el planificador local de ROS (véase Fig. 2). Este tipo de configuración permite explotar la robustez de ROS con respecto a la gestión de incertidumbre y el uso de sistemas avanzados de control reactivo, mientras que se dota de un comportamiento más "social" desde un punto de vista HRI.

Para la obtención del camino global en Unity 3D, se ha utilizado un paquete de generación de trayectorias típico de los entornos de videojuegos: *Pathfinding-Project*⁶. Este paquete permite escanear el entorno virtual previamente generado para obtener el espacio transitable a través del cual, mediante algoritmos como el A*, se obtiene el camino a seguir formado por un conjunto de puntos de interés. Un ejemplo de su uso puede verse en la Fig. 3, en la que se comprueba que en caso de trabajar en un entorno sin presencia humana, el resultado obtenido es muy similar al de un planificador típico en robótica.

No obstante, el objetivo es hacer uso de las características dinámicas y sociales integradas en este tipo de plataformas para trabajar en entornos dinámicos y con presencia humana. Concretamente, este planificador contempla una propiedad

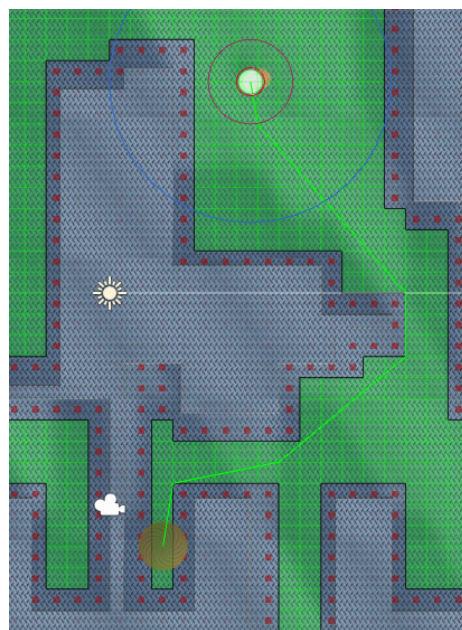


Figura 3: Ejemplo de uso de Unity 3D para la generación de caminos en un entorno sin presencia humana. En este caso el resultado obtenido es muy similar al de un planificador típicamente robótico.

denominada obstáculo dinámico que sirve para especificar que el objeto que la posea puede cambiar de posición o forma durante el tiempo de ejecución. Explotando esta propiedad, diseñamos las diferentes áreas proxémicas de las que disponemos los humanos [11, 14], las cuales vienen dadas por diversos factores como por ejemplo la actividad, estado de ánimo o el tamaño de la persona (Véase Fig. 4). Atendiendo a esta nueva propiedad, la planificación de la trayectoria cambia radicalmente, tal y como ilustramos en la Sección 3 con tres casos comunes de HRI.

2.2 Plugin del Planificador Global y Conexión entre Sistemas

El uso del planificador de trayectorias y el modelado de la proximidad incluidos en Unity 3D vienen condicionados a disponer en dicha plataforma de conocimiento del entorno, de la posición actual del robot, del destino a navegar, y de la presencia de humanos, factores que son generados y/o gestionados por ROS. La Fig. 5 muestra el diagrama de conexiones implementado para este caso de uso.

- **Mapa de Ocupación:** Para la generación del entorno tridimensional en Unity 3D, se realiza una suscripción al topic: `/map` de ROS que posee el mapa de ocupación de obstáculos. Este consiste en un mapa de rejilla en la cual cada celda representa la

⁵http://wiki.ros.org/move_base

⁶<https://arongranberg.com/astar/>

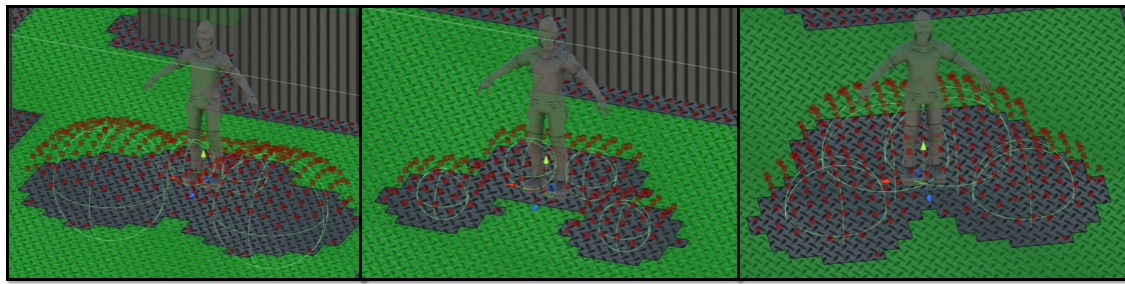


Figura 4: Diferentes áreas proxémicas generadas entorno a una persona mediante Unity 3D.

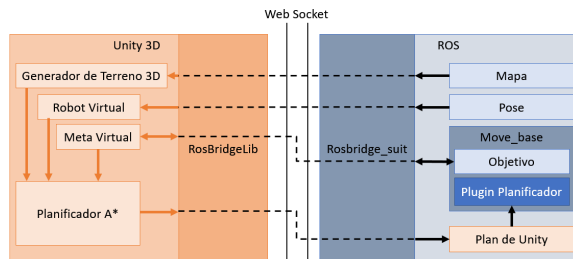


Figura 5: Diagrama representativo del tránsito de información entre Unity 3D y ROS para el caso de la planificación de trayectorias atendiendo a la proxémica.

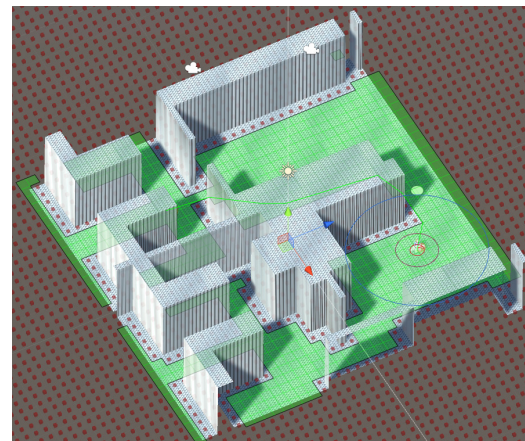


Figura 6: Reconstrucción 3D en Unity del mapa de ocupación de obstáculos utilizado en ROS.

probabilidad de ocupación. Esta información probabilística es binarizada en Unity 3D para generar un mapa del entorno 3D (véase Fig. 6), asignando una celda como libre si $p < 0,5$ y viceversa. Es importante mencionar que a diferencia de los sistemas robóticos, Unity no considera probabilidades ni incertidumbre en los datos, aspecto que solventamos haciendo uso del planificador local de ROS.

- **Posición del Robot:** Para poder acceder a esta pose y llevar a cabo la planificación de la trayectoria, Unity se suscribe a través de la arquitectura software propuesta al topic */amcl_pose*. Este contiene la creencia sobre la pose del robot en el entorno. Una vez más, esta información es probabilística, representando la pose más probable de entre una serie de candidatos, lo cual implica que esta puede cambiar (incluso de forma drástica) a lo largo del tiempo. Este topic es comúnmente actualizado por módulos ROS de localización probabilística, como es el caso del filtro de Kalaman o el filtro de partículas.
- **Destino de Navegación:** Se prevé la posibilidad de que el destino al que el robot debe ir, pueda venir impuesto desde cualquiera de las dos plataformas, de esta manera, se brinda la opción de mover al robot a los al-

goritmos diseñados tanto en ROS como en Unity 3D. Para lograr esto, se utiliza el topic */move_base/goal* de manera bidireccional permitiendo a ambos entornos escribir y leer la posición de destino deseada, la cual se vincula con la posición de un objeto virtual, de manera que si se mueve el objeto se publica la nueva posición en ROS y viceversa.

- **Presencia de Humanos:** En este trabajo asumimos que se dispone de un modulo ROS para la detección y localización de las personas en el entorno. A partir de dicha información, Unity 3D asigna el rol de un jugador y por tanto, les añade el área proxémica previamente definida.

Con estos datos, Unity 3D genera la trayectoria global correspondientes, y la publica en el topic de ROS */unity_data/global_plan* para ser gestionado posteriormente por el planificador local de ROS (véase Fig. 2). Dado que este planificador local dispone de más información para la navegación (p.e. detección de obstáculos no contenidos en el mapa de ocupación) es muy probable que este se desvíe del plan global inicialmente trazado. Para mantener una consistencia en el sistema, Unity re-

calcula el camino global periódicamente y en caso de que se obtenga una nueva ruta diferente a la inicial, esta se reenvía a ROS.

3 Caso Práctico: Planificación de Trayectorias

Para validar la arquitectura propuesta y analizar las ventajas que los motores de IA contenidos en Unity 3D ofrecen a la hora de modelar la interacción entre robots y humanos, en esta sección se describen varios experimentos en los que se comparan las trayectorias generadas por el navegador que utiliza ROS de manera predefinida y el navegador de Unity 3D. Más concretamente, presentamos tres escenarios comunes en la interacción hombre-robot: esquivar a un humano que se encuentra en el área de actuación del robot, aproximarse a una persona para establecer un diálogo, y evitar cruzar entre dos personas que están dialogando.

En todos los casos, modelamos el área proxémica de las personas involucradas mediante la consideración de cuatro esferas (véase Fig. 4), las cuales han sido parametrizadas atendiendo a los estudios presentados en [9]. Estas áreas representan zonas que el robot no debería invadir para lograr un comportamiento natural y social desde un punto de vista HRI.

3.1 Caso A: Navegación evitando una presencia humana

En el primer caso expuesto, el robot tiene que navegar de un punto a otro del mapa evitando la presencia humana en su trayectoria. Atendiendo al uso de la proxémica, el robot no debería invadir el espacio personal de la persona, por lo que tiene que considerar alejarse de la persona lo suficiente como para evitar hacerlo.

En la Fig. 7 se muestran los resultados comparados del planificador por defecto que se utiliza en ROS y el planificador de Unity 3D utilizando la arquitectura propuesta en este artículo. En azul se observa el camino que sigue el robot cuando se utiliza el navegador de ROS, el cual considera la persona como un obstáculo más del mapa. Como consecuencia, el robot invade el área proxémica de la persona. Igualmente, en verde se observa el camino generado por el planificador global de Unity 3D, el cual provee un camino que no invade el espacio proxémico generado para la persona, de manera que al usar este camino en un robot mediante la arquitectura propuesta, se consigue un desplazamiento más natural desde el punto de vista de la persona.

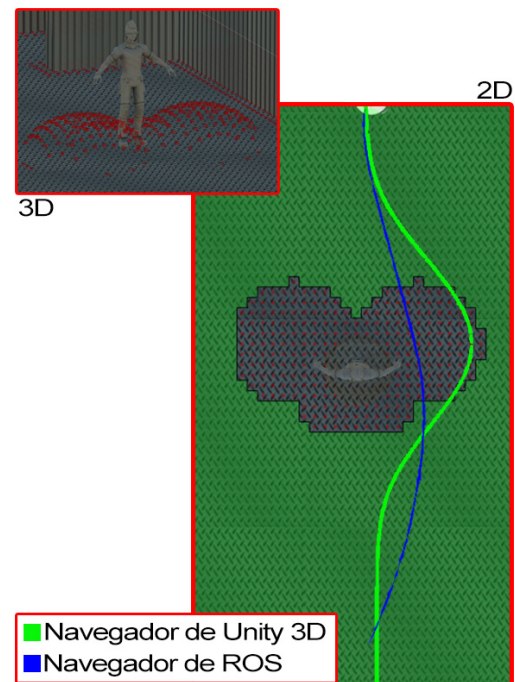


Figura 7: Comparativa de trayectorias cuando el robot se cruza con una persona en su paso.

3.2 Caso B: Interacción Directa con Humano

En este caso, se comprueba como es el acercamiento del robot cuando tiene que ir a interactuar con una persona, por ejemplo para hablar con ella, o entregarle algo. Al igual que en el caso anterior, el comportamiento deseado desde un punto de vista proxémico resulta de realizar un acercamiento sin invasión del área personal. Además, el robot debe ir hacia la persona desde una posición frontal a esta.

El resultado obtenido de la comparación de ambos planificadores se observa en la Fig. 8, donde mediante el uso del navegador por defecto de ROS, el robot invade el área proxémica de la persona rodeandola y acercándose a ella desde el lateral al igual que si esta fuese un obstáculo más del entorno. En cambio, el navegador global de Unity 3D obtiene un camino que evita la invasión del área designada como espacio proxémico, el cual permite que el acercamiento a la persona se realice encarándola.

3.3 Caso C: Navegación evitando espacios proxémicos de grupos de personas

Por último, se comprueba el comportamiento del robot cuando este debe ir de un punto a otro de la sala pero a diferencia del caso A, se han colocado dos personas encaradas que simulan tener una conversación. Puesto que cada persona tiene su propia distancia personal, al estar cerca una de

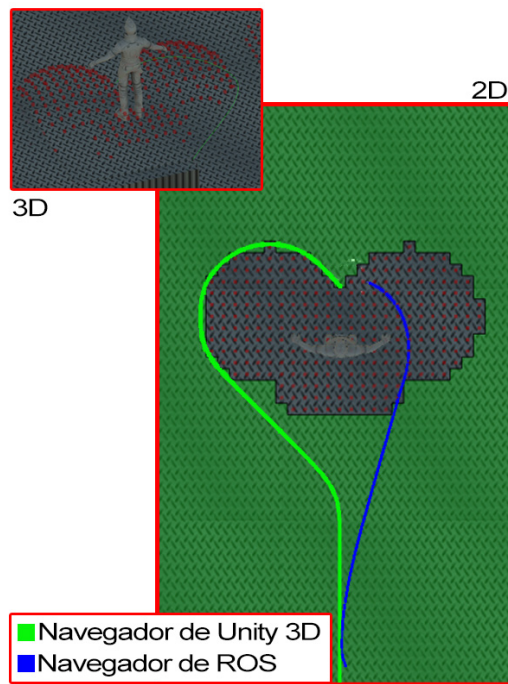


Figura 8: Comparativa de trayectorias cuando el robot va hacia una persona.

otra, se combinan generando un área mayor [8]. Cuando el robot navegue debe evitar pasar entre las personas ya que además de resultar poco natural, interrumpiría a las personas sin necesitar su atención.

En la Fig. 9 se muestran los resultados obtenidos de realizar este caso. Se muestra como el camino generado por el navegador de ROS, cruza entre las dos personas por lo que resultaría un comportamiento poco adecuado en base a la proxémica de las personas. Por el contrario, el camino generado por el navegador de Unity 3D al considerar las áreas asignadas a las dos personas genera un camino que rodea a ambas sin interrumpirlas.

Para concluir con esta sección, cabe destacar que en todos los casos expuestos, se puede comprobar que el navegador de Unity 3D, al considerar la persona como un obstáculo dinámico, pospone la reacción a dicho obstáculo hasta que la invasión del área proxémica es inminente. Esta decisión consigue que si la persona se ha desplazado durante el desplazamiento del robot, para cuando el camino se actualice mantendrá la trayectoria óptima. En comparación, el navegador predefinido en ROS prevé que tiene que desviarse por la existencia de un objeto estático, aunque quizás no sea necesario cuando se aproxime y por tanto se habrá desviado del camino óptimo.

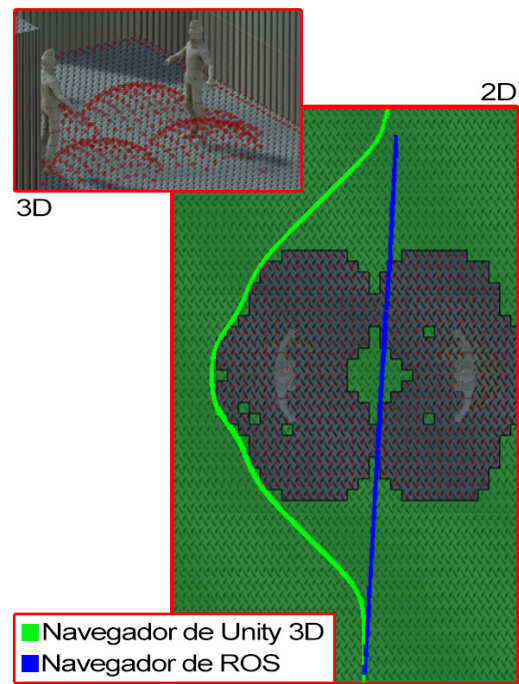


Figura 9: Comparativa de trayectorias cuando el robot se encuentra con un grupo de personas.

4 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos, se puede afirmar que Unity 3D se puede utilizar como un elemento de ayuda para el desarrollo de las HRI brindando un amplio conjunto de paquetes libres que pueden ser utilizados para mejorar el comportamiento de los robots. En este artículo se ha utilizado uno de estos paquetes para el diseño de un navegador que contempla el área proxémica de las personas. El diseño de estas áreas pueden realizarse en ROS mediante mapas de coste pero resulta más tedioso y conlleva más tiempo de desarrollo para realizar ensayos.

Siguiendo la línea de contribución de este artículo, podría implementarse al navegador diferentes reglas que modifiquen el área proxémica de la persona en función del contexto en que se encuentre. Esto supondría que el robot tendría comportamientos diferentes en función de la hora del día, o de las situaciones de las personas de su entorno generando como resultado un comportamiento mucho más natural y por tanto contribuyendo en la mejora de las HRI.

Aunque en este artículo se ha explotado Unity 3D para la navegación del robot, hay disponibles multitud de paquetes que pueden contribuir en otras áreas de la robótica, por ejemplo aportando una interfaz intuitiva para el usuario, mediante el uso de la realidad virtual, o incluso usando la inteligencia artificial que aportan los videojuegos

para generar el comportamiento del robot. Las ventajas de Unity 3D ya han sido usadas por otros artículos previamente como por ejemplo [1] donde explotan el motor de animaciones para generar movimientos en un robot.

En conclusión, existen numerosos frentes de interés en donde los entornos de desarrollo de videojuegos pueden complementar la programación de los robots, agilizando o añadiendo soporte a nuevas áreas de desarrollo que en conjunto mejorarán las capacidades sociales de los robots.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado a través del plan nacional, gobierno de España (proyecto DPI2014-55826-R), y por la Unión Europea, dentro del programa Horizonte 2020-ICT (proyecto 732158 - MoveCare).

Referencias

- [1] C. Bartneck, M. Soucy, K. Fleuret, and E. B. Sandoval. The robot engine; making the unity 3d game engine work for hri. In *2015 24th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, pages 431–437, Aug 2015.
- [2] R. Codd-Downey, P. M. Forooshani, A. Speers, H. Wang, and M. Jenkin. From ros to unity: Leveraging robot and virtual environment middleware for immersive teleoperation. In *2014 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, pages 932–936, July 2014.
- [3] M.J. Matarić D. Feil-Seifer. Human robot interaction. *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, pages 4643–4659, 2009.
- [4] Edward T Hall, Ray L Birdwhistell, Bernhard Bock, Paul Bohannon, A Richard Diebold Jr, Marshall Durbin, Munro S Edmonson, JL Fischer, Dell Hymes, Solon T Kimball, et al. Proxemics [and comments and replies]. *Current anthropology*, 9(2/3):83–108, 1968.
- [5] Yuchao Hu and Wei Meng. Rosunitysim: Development and experimentation of a real-time simulator for multi-unmanned aerial vehicle local planning. *SIMULATION*, 92(10):931–944, 2016.
- [6] B. Jensen, N. Tomatis, L. Mayor, A. Drygajlo, and R. Siegwart. Robots meet humans-interaction in public spaces. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(6):1530–1546, Dec 2005.
- [7] K. Kosuge and Y. Hirata. Human-robot interaction. In *2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pages 8–11, Aug 2004.
- [8] Thibault Kruse, Patrizia Basili, Stefan Glasauer, and Alexandra Kirsch. Legible robot navigation in the proximity of moving humans. In *Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO), 2012 IEEE Workshop on*, pages 83–88. IEEE, 2012.
- [9] Thibault Kruse, Amit Kumar Pandey, Rachid Alami, and Alexandra Kirsch. Human-aware robot navigation: A survey. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(12):1726–1743, 2013.
- [10] J. E. Laird. Using a computer game to develop advanced ai. *Computer*, 34(7):70–75, Jul 2001.
- [11] Ross Mead, Amin Atrash, and Maja J Matarić. Automated proxemic feature extraction and behavior recognition: Applications in human-robot interaction. *International Journal of Social Robotics*, 5(3):367–378, 2013.
- [12] Jonathan Mumm and Bilge Mutlu. Human-robot proxemics: physical and psychological distancing in human-robot interaction. pages 331–338, 2011.
- [13] Begoña San Miguel and M^a Jose Gonzalez. El envejecimiento de la población española y sus consecuencias sociales. *Cuadernos de trabajo social*, (9):19–45, 2001.
- [14] Emrah Akin Sisbot, Luis F Marin-Urias, Rachid Alami, and Thierry Simeon. A human aware mobile robot motion planner. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(5):874–883, 2007.

Micrófonos de contacto: una alternativa para sensado táctil en robots sociales

Juan José Gamboa
University Carlos III of Madrid
jgamboa@ing.uc3m.es

Sara Marqués Villaroya
University Carlos III of Madrid
sмарques@ing.uc3m.es

Fernando Alonso-Martín
University Carlos III of Madrid
famartin@ing.uc3m.es

Marcos Maroto
University Carlos III of Madrid
marmarot@pa.uc3m.es

José Carlos Castillo
University Carlos III of Madrid
jocastil@ing.uc3m.es

Miguel Ángel Salichs
University Carlos III of Madrid
salichs@ing.uc3m.es

Resumen

En la interacción humano-máquina, especialmente en la robótica social, el contacto directo entre el humano y el robot, y todo lo que permite al robot reaccionar y obtener información de este contacto, tiene una gran relevancia. Entre la información que el robot obtiene se encuentra aquella relacionada con la parte del cuerpo del robot que se está tocando y qué gesto se pretende transmitir con dicho toque. A través de este artículo, se pretenden evaluar, en primer lugar, las actuales tecnologías que envuelven la interacción táctil aplicada a la robótica. Por otro lado, se busca aportar un enfoque nuevo a la interacción táctil en la robótica social, presentando aplicaciones y sistemas que emplean el sonido como fuente de información principal. Este trabajo propone un sistema de detección de gestos táctiles en un robot social empleando tecnologías de adquisición sonora.

Keywords— percepción acústica, interacción táctil, interacción humano-máquina, robótica social

1. Introducción

A través del tacto los seres humanos somos capaces de transmitir una gran cantidad de información. Desde un cálido apretón de manos a un abrazo, hemos desarrollado lenguajes complejos y expresiones emocionales a través del contacto físico [1]. Se pretende dotar, del mismo modo, a un robot social de estas habilidades, ya que multiplican el número de posibilidades por las cuales se podría interactuar con él [2], añadiendo una fuente de información que, como se ha indicado antes, posee una gran cantidad de matices. El problema que surge en la actualidad es que los sistemas que se encuentran disponibles requieren cubrir prácticamente la totalidad de la carcasa del robot con sensores [3].

Un robot social necesitaría de un modo que permita percibir los estados emocionales del usuario, o simplemente poder comprender de una mejor manera la intención comunicativa del usuario con respecto al robot. El tacto es un tipo de interacción

que permite la transmisión de esta información. El problema a la hora de implementar este tipo de sistemas es elegir el tipo de tecnología más adecuado. En este caso se propone el sonido como vehículo para esta transmisión de datos. La acción de tocar una superficie sólida genera un contacto que puede ser percibido por distintos tipos de tecnologías, pero además un sonido se genera. Éste puede ser detectado, procesado y reconocido empleando técnicas de análisis de audio y micrófonos, obteniendo además información con una gran cantidad de matices, ya que es una señal que posee características en varios dominios, como son el del tiempo el de la frecuencia y el del tiempo-frecuencia. Esta perturbación se esparce fácilmente por los sólidos, pero no tanto en el aire. Esto implica que colocando el sensor adecuado sobre una superficie se podrá obtener esta señal con una gran precisión, buscando además ignorar los ruidos que se propaguen por el aire, como la voz o cualquier sonido ambiental. Estos dispositivos se conocen como micrófonos de contacto.

A lo largo de este trabajo se exploran las principales tecnologías que en la actualidad, en el campo de la interacción humano-máquina, se han desarrollado con el objetivo de identificar distintos tipos de contacto a través de varias clases de sensores, aplicando además aprendizaje automático. También se presentan diversas aplicaciones que, en otros campos, emplean tecnología relacionada con el sonido para reconocer gestos táctiles. Este trabajo propone, a través de la revisión de sistemas que implementan interacción táctil en robótica y de interfaces táctiles basadas en el análisis de una señal de audio, un sistema que emplee micrófonos de contacto para detectar gestos táctiles en un robot. Este sistema se complementará con diversos algoritmos de aprendizaje automático, con el objetivo de caracterizar e identificar el gesto detectado.

2. Tecnologías actuales

En la siguiente sección se presentan las tecnologías actuales relacionadas con la interacción táctil a través de dos perspectivas. En primer lugar se introducen distintas tecnologías relacionadas con la interacción humano-máquina táctil, tecnologías

que involucran el uso de sensores de fuerza, de visión o incluso de temperatura, además de aprendizaje automático, para encontrar patrones en la información que estos sensores perciben, de forma que se pueda identificar el contacto que se está realizando.

La otra perspectiva que se plantea es la de diferentes interfaces táctiles que involucran sonido. En este caso no se enfocan en la interacción humano-máquina en sí, sino que son aplicaciones con propósitos más diversos, como la comunicación con un servicio contestador automático o el control de un dispositivo de audio.

2.1. Interacción humano-máquina táctil

En el trabajo de Argall [3] encontramos un estudio completo acerca de las habilidades táctiles aplicadas a la robótica social que compara distintos robots con materiales diferentes en sus carcasas. En el caso de robots con superficies duras, los sensores que se suelen emplear son los siguientes: fuerza/torque, Resistencias Sensibles a Fuerza (FSR), acelerómetros y sensores de deformación. Por otro lado, en los robots de “piel blanda”, se suelen incorporar: potenciómetros (información kinestética), FSR’s, sensores de capacitancia, sensores de temperatura (termistores), sensores de campo eléctrico, y fotorelectores. Argall no menciona el uso de micrófonos como base para habilidades de tacto. En general, los sensores que se suelen usar en HRI tienen las siguientes deficiencias: requieren prácticamente contacto directo y su alcance para detectar contacto esta limitado a unos pocos centímetros, por tanto es necesario equipar al robot con una gran cantidad de sensores para cubrir prácticamente por completo la carcasa del mismo (en la mayoría de los casos son más de 40 sensores por robot). Por ejemplo, el robot “abrazable” presentado por Stiehl integra más de 1000 sensores de fuerza, 400 sensores de temperatura, y 9 sensores de campo eléctrico [4].

En posteriores trabajos, Silvera lleva a cabo múltiples experimentos [5, 6] empleando un sistema compuesto por un brazo artificial cubierto por una piel sensitiva basada en tecnología de impedancia eléctrica tomográfica que es capaz de diferenciar entre múltiples tipos de tacto. Para ello, los autores incluyeron un algoritmo de aprendizaje automático denominado *LogicBoost* [7] con el que se logra reconocer seis tipos de contacto. Con esta configuración, Silvera afirma que obtiene el 80 % de precisión, similar a la que poseen los seres humanos.

Siguiendo la misma línea, Cooney presenta un trabajo que intenta diferenciar distintos contactos afectivos sobre el robot humanoide Kirin [8]. Pa-

ra clasificar los toques, construye un clasificador *SVM* (*Support Vector Machine* en inglés) y un clasificador *k-NN* (*k* vecinos más cercanos). El trabajo descrito está basado en técnicas de visión con sensores Kinect, y 14 sensores KINOTEX¹ modificados [9] y distribuidos sobre la superficie del cuerpo del robot. Mezclando los resultados de los clasificadores, afirma obtener un 90.5 % de precisión.

2.2. Interfaces táctiles basadas en el análisis de sonido

Hasta este punto, se ha analizado el estado del arte en el campo de la interacción humano-máquina asociada a la robótica. Esta sección está dedicada al análisis de las interfaces que incorporan tecnología de audio para detectar y/o clasificar toques dentro de diversas áreas tecnológicas no relacionadas con la interacción humano-máquina (HRI, por sus siglas en inglés), debido a que hasta ahora no hay abundantes aplicaciones en el campo de la interacción humano-máquina.

Paradiso [10] describe un sistema para localizar de un modo brusco la posición de golpes y toques sobre una superficie de cristal de un tamaño de un metro cuadrado. Paradiso emplea cuatro receptores piezoeléctricos (conocidos también como micrófonos de contacto) colocados en las cuatro esquinas del cristal. Específicamente usa el modelo *Panasonic EFV-RT series*. Paradiso afirma en el informe obtener grandes resultados, con una precisión de entre 2 y 4 centímetros.

Harrison [11] perfiló un sistema que permite, a través del análisis de audio, reconocer toques sobre distintos materiales, especialmente escritorios y muros. Afirma que este sistema puede diferenciar entre seis tipos de toques con una precisión alrededor del 90 %. Para ello, emplea un estetoscopio modificado que es capaz de amplificar la señal recibida. En este trabajo, el autor no intenta localizar la fuente del sonido, se centra principalmente en reconocer el tipo de toque realizado.

Murray-Smith [12] introduce *Stane*, un dispositivo electrónico controlado por interacción táctil basada en micrófonos. Específicamente, *Stane* puede reconocer esos gestos: *stroke* (caricia), *scratch* (arañazo), *rub* (frote) y *tap* (toque con un dedo). Para ello, usa una combinación de sensores: ca-

¹consisten en un diodo emisor de luz, un fotodetector, espuma de uretano, y cables de fibra óptica. Los cables se usan para irradiar a la espuma con un rayo de luz fino, y para recoger la luz esparcida por la espuma. El principio de funcionamiento de los sensores KINOTEX es medir a través del fotodetector cambios en la intensidad de la luz al final del cable de fibra óptica

pacitivos, inerciales, y micrófonos de contacto. La aplicación real de *Stane* es controlar un reproductor musical. Murray-Smith argumenta que el uso de micrófonos de contacto o piezo-micrófonos es perfectamente adecuado para recibir las vibraciones generadas por ese tipo de contactos sobre superficies sólidas. Para la tarea de clasificación, emplea una red neuronal entrenada con 26880 ejemplos. Sus resultados experimentales muestran una tasa de acierto en torno al 75 % para los cinco tipos de contacto indicados anteriormente.

Lopes [13] muestra un sistema que intenta extender los sistemas multi-toque tradicionales. Mezcla dos tecnologías distintas, sensores capacitivos para detectar la posición del toque, y percepción acústica para reconocer diferentes gestos táctiles como: dedos, nudillos, uñas de los dedos y puños. Aunque Lopes muestra una interacción bastante precisa, la publicación no indica específicamente resultados sobre la tasa de acierto.

2.3. Análisis de las tecnologías y trabajos estudiados

Como se mostraba en el análisis de Argall, la introducción de sensores para realizar tareas de interacción táctil implica costosas redes sensoriales (más de mil sensores en el sistema que presenta). Silvera corrobora esto pero planteando una serie de gestos táctiles de gran interés. Por último Cooney introduce el uso de algoritmos como máquinas de soporte vectorial (SVM, por sus siglas en inglés) y los k vecinos más cercanos (k -NN).

En cuanto a la aplicación de tecnología acústica, en la mayor parte de casos es empleada para localización directa del origen, procesando la señal obtenida por los micrófonos. En el caso de *Stane*, Murray-Smith aplica clasificación (redes neuronales) para detectar gestos. Lopes presenta un trabajo similar, pero sin dar detalles de la fase de clasificación.

A partir de las ideas que se muestran en estos dos enfoques, en este trabajo se plantea un sistema que, aplicado a la interacción humano-máquina, combine conceptos de las dos tecnologías que se acaban de analizar. En cuanto a los sensores que se deciden emplear, se han seleccionado los micrófonos de contacto, siendo uno de los objetivos que el sistema evite emplear una gran cantidad de sensores. Gracias a las ideas de Murray-Smith, con conjunto con las de Silvera, se muestra un atisbo de lo que sería dirigir la robótica y los micrófonos de contacto hacia la detección de gestos táctiles. Por último, la mayor parte de los trabajos insertan un bloque de clasificación que permita sacar conclusiones de la información obtenida, destacando

clasificadores como *SVM*, *k-NN* y redes neuronales.

3. Sensado táctil en un robot social

La implementación de un sistema que use micrófonos de contacto para detección de toques consiste en 4 fases que se van a desglosar a lo largo de este capítulo: Instalación de los micrófonos de contacto, detección de la actividad táctil, extracción de las características de la señal obtenida durante la actividad y por último, la clasificación.

3.1. Instalación de los micrófonos

La selección de micrófonos de contacto está basada en la calidad de la señal captada y la sensibilidad que poseen en superficies lisas y rígidas. Otra de las características es que aísla de manera natural ruidos que se propaguen por el aire, lo que hace que los ruidos externos más corrientes, como la voz humana no sean recogidos por el sensor. La desventaja principal que se observa en un primer momento es que, precisamente esa fidelidad en la extracción de las vibraciones que se propagan por los sólidos, causa que los ruidos internos dentro del robot provocados por los servomotores puedan causar falsos positivos. En cualquier caso eso sería un problema abordable tanto desde el punto de vista del hardware, introduciendo aislamiento físico, como desde el software, a través de filtros en el extractor de características o en el clasificador.

De entre los posibles tipos de micrófonos nos decantamos por uno de precio asequible (35 euros) y de una calidad bastante contrastada por profesionales del mundo de la música. El modelo elegido ha sido el *Oyster Schaller 723* mostrado en la figura 1.



Figura 1: Micrófono de contacto Oyster Schaller 723 S/S

El robot social que ha servido como plataforma de investigación, y por lo tanto, como base para realizar los experimentos realizados, es el robot Maggie, del Robotics Lab de la Universidad Carlos III de Madrid[14].

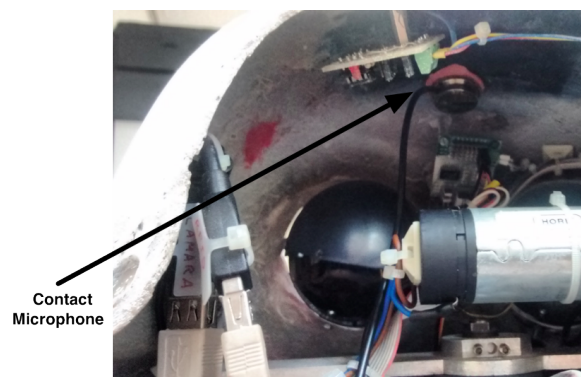


Figura 2: Micrófono instalado en el interior de la cabeza de Maggie

En la primera versión se decide instalar un total de tres micrófonos en las zonas que se consideran que se va a establecer con más probabilidad un contacto. Estas partes son la cabeza, y el pecho (izquierda y derecha). Para fijar los micrófonos en el interior de la carcasa, que es rugosa y cóncava se ha empleado arcilla para modelar y adhesivo de dos componentes. Gracias a las propiedades moldeables pero rígidas al secarse de ambos, se puede fijar la totalidad de la superficie sensible del micrófono al interior del robot, como se muestra en la Fig. 2. Los micrófonos serán conectados en Maggie de la siguiente manera. La salida Mini-jack es conectada a unas tarjetas de sonido USB Sound-Blaster² de alta fidelidad.

3.2. Detección de actividad táctil

A nivel de software se ha empleado Chuck [15], un lenguaje de programación diseñado para proveer a los usuarios de una plataforma para síntesis y análisis precisa de audio.

Para la detección como la extracción de características de la señal sonora se ha empleado una versión modificada para esta tarea de GEVA (*Gender and Emotion Voice Analysis*) [16], un programa creado para detectar tanto el género como la emoción que transmite un interlocutor al hablar. GEVA es un sistema de análisis de sonido diseñado y desarrollado en Chuck que combina varios elementos pertenecientes a tres dominios diferentes: tiempo, frecuencia y tiempo-frecuencia. La principal funcionalidad del programa es que calcula las características pertenecientes a cada uno de los dominios en tiempo real, analizando directamente la señal sonora capturada.

GEVA presenta una serie de umbrales ajustables referentes a la señal que permiten diferenciar cuando parte del sonido recibido, ya que los micrófo-

nos se encuentran escuchando continuamente, no es ruido ambiental o un tipo específico de sonido que se quiera aislar, y marca el principio de un gesto. Uno de estos umbrales, y el que se emplea principalmente es el *Signal-to-Noise Ratio*, que se explicará más adelante.

3.3. Extracción de características

Una vez que el sistema considera que el gesto ha comenzado, GEVA mide distintas características, englobadas en tres dominios diferentes, pero relacionadas entre sí mediante transformadas.

- Las características que se encuentran en el *dominio del tiempo* se obtienen directamente del muestreo de la señal analógica que proviene del micrófono.
- En el caso de las características que están en el *dominio de la frecuencia* se aplica la transformada rápida de Fourier (FFT) sobre la señal en el dominio del tiempo.
- Por último, para obtener las características pertenecientes al *dominio del tiempo-frecuencia* se aplica la transformada discreta de Haar (*Discrete Haar Wavelet Transform*).

Las características que se obtienen de la señal son los siguientes.

1. **Pitch:** Es una propiedad de los sonidos que permite su ordenación en una escala relativa a la frecuencia [17]. Cuantitativamente, las estimaciones del pitch son medidas del periodo de oscilación y se pueden realizar en los tres dominios mencionados anteriormente. En cada dominio se encuentran implementados distintos algoritmos de detección de pitch (PDA o pitch detection algorithms):
 - a) El método para detectar el primer mínimo en la autocorrelación de la señal de entrada en el dominio del tiempo. Esto implica que el pitch se corresponde al mínimo en la relación de cruce entre la señal sonora consigo misma [18, 19].
 - b) El segundo método aplica la transformada rápida de Fourier. Este algoritmo considera la distancia entre los picos en el espectro de la señal para calcular el pitch.
 - c) El último método para obtener el pitch se desarrolla en el dominio del tiempo-frecuencia, y usa la transformada discreta de Haar para ondas. Este cálculo se basa en el trabajo de Larson [20].

²Diseñadas por Creative Labs. Modelo SB1300.

2. **Flujo**: El flujo indica si hay grandes variaciones en el dominio de la frecuencia. Cuando toma valores cercanos al cero implica que los valores de amplitud obtenidos en todos los rangos de frecuencia son muy similares.
3. **Rolloff-95**: Se corresponde con el valor de frecuencia que contiene el 95 % de la energía de la señal.
4. **Centroide**: Representa la mediana del espectro de la señal. Esto es la frecuencia a la que la perturbación se aproxima en mayor medida. Se usa frecuentemente para calcular el tono de un sonido o la voz (timbre).
5. **Zero-crossing rate (ZCR)**: Indica el número de veces que la señal cruza el cero (en el eje x). Normalmente, el sonido de fondo cruza con mucha más frecuencia el eje x que los sonidos verbales.
6. **Signal-to-noise ratio (SNR)**: Permite relacionar el sonido que genera el gesto con respecto al volumen del ruido de fondo.
7. **Root Mean Square (RMS)**: relativo a la amplitud del volumen de la señal.
8. **Duración**: hace referencia a duración del sonido.

Cuando finaliza el contacto, el programa emite los valores máximos, mínimos, valores medios y la diferencia entre máximo y mínimo de las características descritas.

3.4. Clasificación automática

Entre las librerías disponibles para realizar tareas relacionadas con el aprendizaje automático, se ha seleccionado *Weka* por su versatilidad. *Weka* soporta varias tareas estándar de minería de datos, especialmente, preprocesamiento de datos, *clustering*, clasificación, regresión, visualización, y selección. Todas las técnicas de *Weka* se fundamentan en la asunción de que los datos están disponibles en un fichero plano (flat file) o una relación, en la que cada registro de datos está descrito por un número fijo de atributos (normalmente numéricos o nominales, aunque también se soportan otros tipos).

Weka integra una amplia familia de clasificadores³ pero entre ellos destacan los que han sido empleados en trabajos como el de Cooney o el de Murray-Smith y los árboles de decisión:

- **Random Forest**. Familia de algoritmos predictivos que emplean la técnica de *bagging* o empaquetado para combinar diferentes árboles de decisión, donde cada árbol es construido con observaciones y variables aleatorias [21]. El algoritmo funciona como se explica a continuación.

En primer lugar, selecciona individuos al azar (usando muestreo con reemplazo) para crear diferentes set de datos. Posteriormente crea un árbol de decisión con cada set de datos, obteniendo diferentes árboles, ya que cada set contiene diferentes individuos y diferentes variables. Al crear los árboles se eligen variables al azar en cada nodo del árbol, dejando crecer el árbol en profundidad (sin podar). Y por último, predice los nuevos datos usando el “voto mayoritario”, donde clasificará como “positivo” si la mayoría de los árboles predicen la observación como positiva.

- **k-NN**. Este es un método de clasificación no paramétrico, que estima el valor de la función de densidad de probabilidad o directamente la probabilidad a posteriori de que un elemento x pertenezca a la clase C_j a partir de la información proporcionada por el conjunto de modelos [22]. En el proceso de aprendizaje no se hace ninguna suposición acerca de la distribución de las variables a predecir. En el reconocimiento de patrones, el algoritmo es usado como método de clasificación de objetos (elementos) basado en un entrenamiento mediante ejemplos cercanos en el espacio de los elementos. *k-NN* es un tipo de *Lazy Learning*, donde la función se aproxima solo localmente y todo el conjunto de cálculos es aplaza hasta la clasificación.

- **SVM**. Weka internamente implementa la optimización secuencial mínima o SMO, un algoritmo para resolver el problema de programación cuadrática que surge durante el entrenamiento de *support vector machines* [23]. SMO es un algoritmo iterativo para resolver este problema de optimización. Divide el problema principal en una serie de subproblemas lo más pequeño posible, que son resueltos analíticamente.

- **Perceptrón Multicapa**. Un clasificador basado en una red neuronal que utiliza *backpropagation* para clasificar instancias. La red se puede construir a mano, crearse a través de un algoritmo o de ambas formas. Ésta también puede ser monitorizada y modificada durante el tiempo de entrenamiento. Los nodos de esta red son todos sigmoides (excepto cuando la clase es numérica, en cuyo caso los nodos

³<http://weka.sourceforge.net/doc.stable/weka/classifiers/package-frame.html>


	Área de contacto	Intensidad	Duración	Intención	Ejemplo
Caricia	media-grande	baja	media-larga	empatía, compasión	
Cosquillas	media	media	media-larga	diversión, alegría	
Toque	pequeña	baja	corta	llamada, aviso	
Cachete	pequeña-media	alta	corta	disciplina, castigo	

Tabla 1: Caracterización de los gestos empleados para las pruebas. La última columna muestra un ejemplo de cómo realizar dicho gesto.

de salida se convierten en unidades lineales no desalineadas).

Esta parte comprende la creación de un conjunto de instancias preclasificadas que se irán creando en experimentos con usuarios. Cuando el conjunto de instancias sea lo suficiente grande se integrará en el sistema para poder entrenar a los clasificadores. De este modo, los clasificadores podrán ir clasificando de modo *online* las nuevas instancias desconocidas que vayan recibiendo.

3.5. Resultados preliminares

Para evaluar el funcionamiento del sistema propuesto se realizó una serie de pruebas para medir la tasa de acierto. En primer lugar se han definido una serie de gestos mostrados en la tabla 1, inspirados por los experimentos de Silvera, previamente explicados. Tras esto, se ha procedido a obtener muestras de entrenamiento. El conjunto de muestras posee las siguientes características. Se han recogido un total de 747 interacciones con el robot, realizadas por un total de 10 usuarios. De los cuales 215 son *caricias*, 48 son *cosquillas*, 260 son *toques*, y 224 son *cachetes*.

Las interacciones entre el robot y los usuarios se han realizado de la siguiente forma. El supervisor pide al usuario que toque al robot en la cabeza usando los cuatro posibles gestos a reconocer. Cada uno de estos tipos de toques los puede repetir un número indeterminado de veces. Cada uno de los sonidos producidos en cada interacción queda registrado por el sistema y es etiquetado con el nombre del gesto realizado por el usuario.

Clasificador	<i>F-score</i>
Random Forest	1
Perceptrón Multicapa	0.93
SVM	0.80
k-NN	0.78

Tabla 2: F-Score de los clasificadores empleando validación cruzada.

Clasificador	<i>F-score</i>
Random Forest	0.79
Perceptrón Multicapa	0.75
SVM	0.72
k-NN	0.66

Tabla 3: F-Score de los clasificadores empleando un conjunto de prueba.

En la fase de entrenamiento, los datos se almacenan en un fichero que posteriormente serán usados tanto para entrenamiento como para validación. En la fase de validación se han empleado dos técnicas: Validación cruzada, que se ha hecho con subgrupos de los datos de entrenamiento de 10 instancias cada uno. Adicionalmente, se recogieron nuevos datos de 15 usuarios diferentes a los 10 que realizaron las muestras previas. En las tablas 2 y 3 se muestra el *F-Score* resultante para cada algoritmo expuesto previamente. Se trata de un indicador del grado de acierto de un determinado clasificador en base a 1, que representa el acierto en todas las muestras.

4. Conclusiones

El sonido es un tipo de señal de la que se pueden obtener una gran cantidad de características, lo que provee a la información transmitida de muchos matices. Esto facilita que la implementación de algoritmos de clasificación aporte muy buenos resultados. Los micrófonos de contacto son un tipo de receptor de audio que demuestra baja distorsión y ruido, percibiendo las vibraciones con una gran precisión. Estos micrófonos son capaces de aislar los ruidos ambientales que se propagan por el aire, que suelen ser los más corrientes (voces, etc). Debido a las propiedades de transmisión del sonido de las superficies sólidas, los ruidos internos se propagan con facilidad y puedan ser recibidos, creando falsos positivos. Como se muestra en el montaje, los micrófonos de contacto tienen como limitación física las superficies rugosas e irregulares y las blandas.

En el trabajo se ha aplicado el aprendizaje como una herramienta capaz de aprovechar la gran riqueza que se obtiene de una señal sonora. Pero dentro de este campo hay protocolos y herramientas que permiten mejorar y profundizar en esta fase del sistema (p. ej. meta-clasificadores), lo que permitiría un margen de mejora muy amplio. Además, con una gran cantidad de información de entrenamiento se pueden aplicar técnicas más complejas pero con mayor tasa de acierto.

Actualmente la tecnología de adquisición de sonido engloba dispositivos que son capaces de obtener una gran cantidad de información de una señal que, como en este caso, se propaga por los sólidos (superficie de un robot). Esto, junto al gran impulso que en la actualidad está viviendo el aprendizaje automático y la creciente capacidad de procesamiento de las computadoras, provoca que la tecnología que se presenta en este trabajo constituya una importante vía para distintos sistemas sensoriales aplicados a la interacción humano-máquina.

Agradecimientos

La investigación desarrollada ha recibido financiación de dos proyectos: "Development of social robots to help seniors with cognitive impairment" (ROBSEN), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad; y "RoboCity2030-III-CM", financiado por la Comunidad de Madrid y cofinanciado por los Fondos Estructurales de la Unión Europea.

Referencias

- [1] F. H. Wilhelm, A. S. Kochar, W. T. Roth, and J. J. Gross, "Social anxiety and response to touch: incongruence between self-evaluative and physiological reactions," *Biological Psychology*, vol. 58, no. 3, pp. 181 – 202, 2001.
- [2] K. Altun and K. E. MacLean, "Recognizing affect in human touch of a robot," *Pattern Recognition Letters*, vol. 66, pp. 31–40, nov 2015.
- [3] B. D. Argall and A. G. Billard, "A survey of tactile human-robot interactions," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 58, pp. 1159–1176, October 2010.
- [4] W. D. Stiehl, J. Lieberman, C. Breazeal, L. Basel, L. Lalla, and M. Wolf, "Design of a therapeutic robotic companion for relational, affective touch," in *ROMAN 2005. IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2005.*, pp. 408–415, Aug 2005.
- [5] D. Silvera-Tawil, D. Rye, and M. Velonaki, "Interpretation of social touch on an artificial arm covered with an EIT-based sensitive skin," *International Journal of Social Robotics*, vol. 6, no. 4, pp. 489–505, 2014.
- [6] D. Silvera Tawil, D. Rye, and M. Velonaki, "Touch modality interpretation for an EIT-based sensitive skin," in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3770–3776, IEEE, may 2011.
- [7] J. Friedman, T. Hastie, and R. Tibshirani, "Additive logistic regression: a statistical view of boosting," tech. rep., Stanford University, 1998.
- [8] M. D. Cooney, S. Nishio, and H. Ishiguro, "Recognizing affection for a touch-based interaction with a humanoid robot," in *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1420–1427, IEEE, oct 2012.
- [9] Y. Ohmura, Y. Kuniyoshi, and A. Nagakubo, "Conformable and scalable tactile sensor skin for curved surfaces," in *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, pp. 1348–1353, IEEE, 2006.
- [10] J. Paradiso and N. Checka, "Passive acoustic sensing for tracking knocks atop large interactive displays," in *Proceedings of IEEE Sensors*, vol. 1, pp. 521–527, IEEE, 2002.
- [11] C. Harrison and S. E. Hudson, "Scratch input: creating large, inexpensive, unpowered and mobile finger input surfaces," in *Proceedings of the 21st annual ACM symposium on User*

- interface software and technology - UIST '08*, (New York, New York, USA), p. 205, ACM Press, October 2008.
- [12] R. Murray-Smith, J. Williamson, S. Hughes, and T. Quaade, "Stane: synthesized surfaces for tactile input," in *Proceeding of the twenty-sixth annual CHI conference on Human factors in computing systems - CHI '08*, (New York, New York, USA), p. 1299, ACM Press, apr 2008.
- [13] P. Lopes, R. Jota, and J. A. Jorge, "Augmenting touch interaction through acoustic sensing," in *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces - ITS '11*, (New York, New York, USA), p. 53, ACM Press, nov 2011.
- [14] M. A. Salichs, R. Barber, A. M. Khamis, M. Malfaz, J. F. Gorostiza, R. Pacheco, R. Rivas, A. Corrales, E. Delgado, and D. Garcia, "Maggie: A robotic platform for human-robot social interaction," in *2006 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, pp. 1–7, June 2006.
- [15] G. Wang, P. R. Cook, and S. Salazar, "Chuck: A strongly-timed computer music language," *Computer Music Journal*, vol. 39, no. 4, pp. 10–29, 2015.
- [16] F. Alonso-Martin, M. Malfaz, J. Sequeira, J. Gorostiza, and M. A. Salichs, "A Multimodal Emotion Detection System during Human-Robot Interaction," *Sensors*, vol. 13, no. 11, pp. 15549–15581, 2013.
- [17] A. Klapuri, *Introduction to Music Transcription*, p. 8. Springer.
- [18] A. Cheveign and H. Kawahara, "Yin, a fundamental frequency estimator for speech and music," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 111, pp. 1917–1930, 2002.
- [19] P. McLeod and G. Wyvill, "A smarter way to find pitch," in *Proceedings of International Computer Music Conference (ICMC)*, (Barcelona, Spain), September 2005.
- [20] E. Larson and R. Maddox, "Real-time time-domain pitch tracking using wavelets," in *Proceedings of the University of Illinois at Urbana Champaign Research Experience for Undergraduates Program*, (Champaign, IL, USA), August 2005.
- [21] T. K. Ho, "Random decision forest," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Document Analysis and Recognition*, pp. 278–282, August 1995.
- [22] D. Aha and D. Kibler, "Instance-based learning algorithms," *Machine Learning*, vol. 6, pp. 37–66, 1991.
- [23] J. Platt, "Sequential minimal optimization: A fast algorithm for training support vector machines," tech. rep., Microsoft Research, April 1998.

Clasificación de información táctil para la detección de personas

Juan M. Gandarias, Jesús M. Gómez-de-Gabriel y Alfonso García-Cerezo
 Dto. de Ingeniería de Sistemas y Automática
 Universidad de Málaga
 jmgandarias@uma.es

Resumen

Este artículo presenta el diseño de un efector final táctil y la aplicación de técnicas de inteligencia artificial para la detección de personas mediante un brazo manipulador ligero de 6 grados de libertad. Este efector está compuesto por un sensor táctil de alta resolución que permite obtener imágenes de presión. El sistema extrae información háptica en situaciones de catástrofe en las que, generalmente, existe baja visibilidad, con el propósito de evaluar el estado de las víctimas en función de la urgencia de atención (triaje). Se han implementado dos métodos de inteligencia artificial para clasificar imágenes obtenidas por el sensor táctil, distinguiendo los contactos con personas de objetos inertes en escenarios de desastre. Cada método dispone de un extractor de características de imágenes de presión y un clasificador, obtenido por aprendizaje supervisado. Para validar los métodos se han realizado experimentos de clasificación en clases Humano y No humano. Finalmente, se ha realizado una comparación de ambos métodos en términos de porcentaje de acierto y tiempo empleado para la clasificación, en base a los resultados de los experimentos.

Palabras clave: Sensores táctiles, robótica de rescate, reconocimiento de objetos, aprendizaje automático.

1. INTRODUCCIÓN

La teleoperación supone un elemento fundamental en el campo de la robótica de rescate, debido a la complejidad de las operaciones a realizar en un entorno no estructurado [7]. Experiencias previas en situaciones reales han evidenciado la problemática de los sistemas basados en percepción visual. En entornos con escasa iluminación, polvo o humo, los sistemas con percepción háptica aportan información adicional que puede compensar las limitaciones visuales [13].

Una de las primeras tareas de la robótica de rescate consiste en clasificar el estado de las víctimas, una vez localizadas, en función de la urgen-

cia de atención (*triaje*). Esta tarea presenta retos tecnológicos como la interacción robot-humano o Human-Robot Interaction (*HRI*), considerado uno de los mayores desafíos de la robótica de rescate [12]. Un primer enfoque a la resolución del problema supondría el reconocimiento de víctimas y de las distintas partes del cuerpo, de cara a poder realizar mediciones posteriormente. Utilizándose para ello percepción táctil únicamente.

En este sentido, existen diversos trabajos cuyo objeto consiste en reconocer objetos utilizando sensores táctiles. La mayoría de estos trabajos están basados en el uso de algoritmos de inteligencia artificial. Algunos sugieren el uso de herramientas de aprendizaje profundo o *Deep Learning*. Así, en [14] se presenta el uso de aprendizaje profundo con técnicas de *dropout* para la reducción del sobreajuste (*overfitting*), y se presentan las mejoras obtenidas al mezclar información táctil y la posición del robot para el reconocimiento. En [1], por el contrario, se aplican herramientas de aprendizaje profundo para la clasificación de los materiales en contacto.

Por otro lado, en [10, 9] se presenta el uso de herramientas de aprendizaje automático o *machine learning* para el reconocimiento de objetos utilizando el descriptor *SIFT* (*Scale-Invariant Feature Transform*) [8] y métodos de clasificación basados en bolsas de palabras o *Bag of Words* (*BoW*). Un trabajo posterior incorpora información de la posición del objeto para crear un algoritmo de clasificación más robusto y eficiente [11].

El Departamento de Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Málaga ha contribuido a la aplicación de sensores táctiles a la robótica de rescate [15], mediante un sensor de presión que proporciona una imagen de las fuerzas de contacto con el entorno, o las víctimas, instalado en la pinza del brazo hidráulico de un robot de rescate [4].

Este artículo presenta una aplicación de los sensores táctiles al campo de la robótica de rescate, consistente en el desarrollo de un efector final de un manipulador ligero de 6 grados de libertad, en el que se ha dispuesto un sensor táctil con el objetivo de obtener imágenes de presión del en-



(a)



(b)

Figura 1: Desarrollo del sensor. (a) Recubrimiento del sensor con caucho de silicona. (b) Montaje del sensor en el brazo manipulador.

torno. Asimismo, se presentan y comparan dos métodos de inteligencia artificial para la clasificación de imágenes de presión. El primer método está compuesto por el descriptor *Speeded-Up Robust Features (SURF)* [2], un modelo *Bag of Words (BoW)* y una *Supported Vector Machine (SVM)* [3]. Mientras que el segundo método se basa en el uso de una *Deep Convolutional Neural Network (CNN AlexNet)* [6] y una *SVM*. De esta forma, un clasificador mediante aprendizaje supervisado, identifica si el contacto se realiza con un humano o con objetos. Finalmente, se evalúan ambos métodos comparando sus porcentajes de aciertos y tiempos de cómputo empleados.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se resume la aplicación junto con el efector táctil desarrollado. En la sección 3 se describen las implementaciones realizadas de los métodos de clasificación utilizados. Posteriormente, en la sección 4 se describen los experimentos y se discuten los resultados obtenidos. Finalmente, se incluyen conclusiones y se plantean trabajos futuros.

2. SENSOR TÁCTIL PARA ROBÓTICA DE RESCATE

Los escenarios de desastre suelen caracterizarse por la limitada percepción visual debido a la presencia de humo o polvo, tanto en suspensión como en superficie. La información táctil puede ser crucial para la identificación de víctimas potenciales. En este sentido, un primer enfoque consistiría en saber con qué clase de objeto se va a interactuar.

Esta primera aproximación permite conocer, de forma automática, si se está tratando con una víctima o no, utilizando únicamente información táctil en forma de mapas de presión. De manera

que se pretende obtener una distinción de estos mapas en dos clases, *Humano* o *No humano*. Para lo que se han desarrollado dos métodos de aprendizaje automático, cuyas características se detallan en el apartado 3.

El sistema que se presenta pretende dotar de capacidad táctil a un brazo manipulador de 6 grados de libertad, el modelo *OUR-i5* de la familia *AU-BO*. En las imágenes de la figura 1 se presenta el desarrollo del sensor táctil que se ha acoplado al robot. El sensor está dispuesto sobre una base de PVC y recubierto de una capa protectora de caucho de silicona que permite la percepción de fuerzas externas. Todo el conjunto se ha diseñado en *SolidWorks* y se han utilizado técnicas de fabricación aditivas de prototipado rápido para la construcción de los soportes y el acoplamiento al brazo.

3. IMPLEMENTACIÓN DE LOS CLASIFICADORES

Se han implementado dos algoritmos de inteligencia artificial. Ambos métodos se basan en un extractor de características de las imágenes de presión y en la obtención de un clasificador aplicando métodos de aprendizaje automático.

3.1. Extracción de características con *SURF*, agrupamiento con *k-means* y *BoW* y clasificación con *SVM*

El esquema de la figura 2 representa las fases de implementación de este método, que consta de dos fases: entrenamiento y prueba. En la fase de entrenamiento se extraen las características de las imágenes del conjunto de entrenamiento mediante el algoritmo de visión por computador *SURF*, que proporciona un detector y descriptor invarian-

te a escala y rotación convirtiéndolo en un método rápido y robusto para describir imágenes.

Posteriormente, basándonos en un modelo *BoW*, se genera un diccionario en el que las palabras se corresponden con las características previamente extraídas, de manera que los descriptores de las imágenes se agrupan en función de las similitudes encontradas por el método de agrupamiento *k-means* no supervisado. Finalmente, se obtiene un clasificador utilizando un método de aprendizaje supervisado, que se basa en el entrenamiento de una *SVM*. Cabe aclarar que las imágenes pertenecientes al conjunto de entrenamiento son distintas a las del conjunto de prueba.

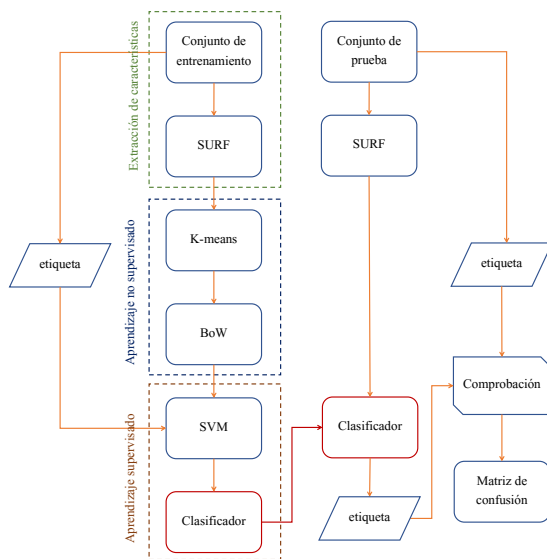


Figura 2: Esquema del método 1. Extracción de características con *SURF*, agrupamiento con *k-means* y *BoW* y clasificación con *SVM*.

Este clasificador permite identificar imágenes de presión dentro de unas clases pre-determinadas durante la fase de entrenamiento. Para evaluar el clasificador, en la fase de prueba se obtienen los descriptores de las imágenes del conjunto de pruebas mediante el descriptor *SURF* y se evalúa el método comparando la clase obtenida de cada imagen con la clase real que le corresponde, de forma que se puede obtener la matriz de confusión y el porcentaje de acierto.

Una vez evaluado el funcionamiento del método, se pueden identificar nuevas imágenes de presión, cuya clase es desconocida *a priori*, obteniendo los descriptores mediante *SURF* y utilizando el clasificador obtenido en la fase de entrenamiento y evaluado en la fase de pruebas. Así, se puede calcular el tiempo que se emplea en clasificar una nueva imagen, lo que sirve también como herramienta para evaluar el rendimiento.

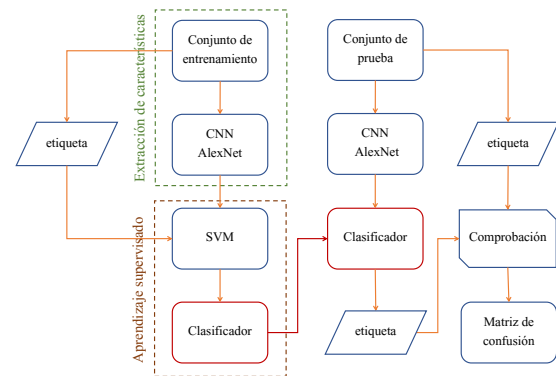


Figura 3: Esquema del método 2. Extracción de características con la *CNN AlexNet* y clasificación con *SVM*

3.2. Extracción de características con la *CNN AlexNet* y clasificación con *SVM*

Por otro lado, el segundo método emplea una red neuronal convolucional profunda (CNN), conocida como *AlexNet* [6]. La red se ha importado del repositorio de *caffe* [5], y posee 650000 neuronas distribuidas en 8 capas, de forma que las 5 primeras son convolucionales y las 3 últimas son completamente conectadas. La red importada ha sido entrenada previamente con el fin de clasificar imágenes dentro de 1000 clases diferentes.

En concreto, el método desarrollado implementa una variante de esta red, aprovechando el concepto utilizado en [16]. Esta idea consiste en utilizar una red neuronal como extractor de características en lugar de como método de clasificación. De forma que se toman las activaciones de la última capa previa a la clasificación, para entrenar una *SVM*.

En este sentido, se puede elaborar un esquema similar al del método 1 que describa el flujo de trabajo desarrollado. Este esquema se encuentra en la figura 3 y sigue las dos mismas fases del método 1: entrenamiento y prueba.

En la fase de entrenamiento se obtienen las activaciones de la capa 7 de la red neuronal, llamada *fc7*. Estas activaciones se corresponden con las activaciones de la última capa previa a la clasificación, y se utilizan para realizar un entrenamiento supervisado con una *SVM* que genera un clasificador.

Este clasificador se evalúa extrayendo las características de las imágenes del conjunto de prueba y comparando las clases generadas con las clases conocidas. De manera que se puede obtener la matriz de confusión y el porcentaje de acierto del clasificador. Finalmente, el clasificador se puede utilizar para identificar nuevas imágenes de presión cuya

clase es desconocida a priori.

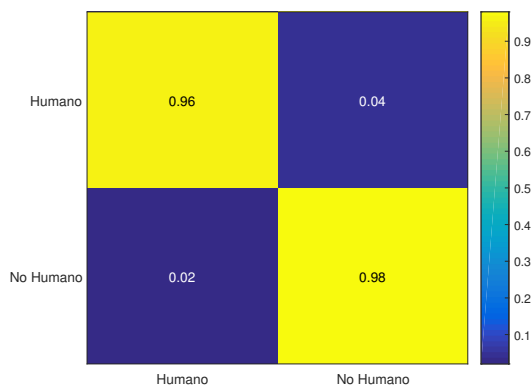


Figura 4: Matriz de confusión resultante de la evaluación del método 1 para clasificar imágenes de presión en las 2 clases *Humano* y *No humano*

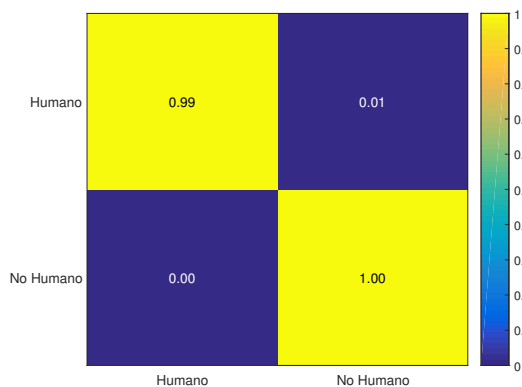


Figura 5: Matriz de confusión resultante de la evaluación del método 2 para clasificar imágenes de presión en las 2 clases *Humano* y *No humano*

4. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

4.1. Descripción

Para llevar a cabo los experimentos se ha utilizado el sensor táctil modelo 6077 de Tekscan. Este sensor posee un total de 1400 sensels resistivos de presión distribuidos en una matriz de 28 filas por 50 columnas con un tamaño de 53.3 mm x 95.3 mm y una densidad de 27,6 sensels/cm². Además, la presión máxima admitida es de 34kPa y el rango de temperatura de trabajo es -40°C a 60°C. El sensor está cubierto por una capa de caucho de silicona que sirve como elemento protector y conductor de fuerzas externas.

Para evaluar los métodos desarrollados para la aplicación de detección de personas en situacio-

nes de catástrofe, se han utilizado 300 imágenes etiquetadas en las clase *Humano*(150) y *No humano*(150). De las cuales 120 se han utilizado para la fase de entrenamiento, y 180 para la fase de pruebas, siendo la mitad de cada conjunto de una clase diferente. Hay que aclarar que las imágenes incluidas en la clase *Humano* se han escogido de las partes: mano, brazo y dedos, debido a que en una situación de catástrofe serían las más propensas a encontrarse desnudas. Por tanto, serían accesibles al robot para realizar la identificación. Además, todas las imágenes de presión etiquetadas en la clase *Humano* se han tomado de una misma persona. Por otro lado, los objetos utilizados en la clase *No humano* han sido un bolígrafo, unos alicates y unas tijeras.

En las imágenes de la figura 6 se pueden ver algunas de las imágenes de presión utilizadas, y etiquetadas en sus correspondientes clases.

4.2. Resultados

En la figura 4 se muestra la matriz de confusión resultante de la fase de evaluación del método 1. A partir de la cual se obtiene un índice de acierto del 96.67 %. Por otro lado, el tiempo que se tarda en clasificar una nueva imagen de presión es del orden de 10ms.

En cuanto al segundo método, se puede observar la matriz de confusión resultante en la figura 5. A partir de la cual se determina un índice de acierto del 99.44 %. El tiempo de clasificación es del orden de 700ms.

En resumen, se ha obtenido una mejora del segundo método con respecto al primero del 2.77 % en la clasificación *Humano* - *No humano*. Sin embargo, el tiempo empleado es, aproximadamente, 70 veces mayor en el segundo. En la tabla 1 se recogen los resultados de tiempo y porcentaje de acierto de cada método, así como el porcentaje de mejora, tomando el primer método como referencia.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se ha presentado el desarrollo de un sensor táctil y su aplicación al campo de la robótica de rescate. Para ello, el sensor se ha instalado en un brazo manipulador ligero, con objeto de identificar el estado de víctimas potenciales en función de la urgencia de atención (triaje). Además, se han implementado dos métodos de inteligencia artificial para clasificar imágenes de presión. Cada método dispone de un extractor de características y un clasificador. El clasificador, en ambos métodos, se ha obtenido mediante aprendizaje supervisado utilizando una

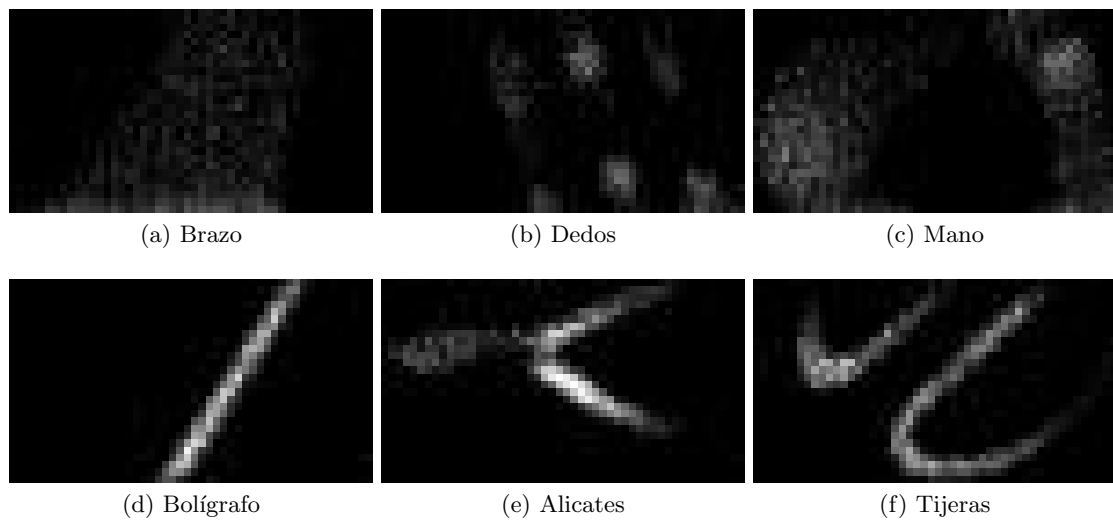


Figura 6: Ejemplos de imágenes de presión. Las imágenes superiores (a), (b) y (c) pertenecen a la clase *Humano* y las inferiores (d), (e) y (f) pertenecen a clase *No humano*

Método	Acierto (%)	Mejora (%)	Tiempo (s)
<i>SURF + SVM</i>	96.67	-	0.01
<i>CNN + SVM</i>	99.44	2.77	0.7

Tabla 1: Resumen de los resultados de los experimentos

SVM (Supported Vector Machine). En cuanto al extractor de características, el primer método incorpora el descriptor *SURF (Speeded-Up Robust Features)*, mientras que el segundo método utiliza una variante de la red neuronal convolucional conocida comúnmente como *AlexNet*. Para validar los métodos se han realizado experimentos de clasificación en las clases *Humano* y *No-humano*, y en subclases de estas. Finalmente, se han realizado los experimentos que sirven como comparativa de ambos métodos.

En este sentido, se ha comprobado que el método 2 obtiene una mejora del 2.77 % con respecto al método 1. Sin embargo, el tiempo empleado en la clasificación de una nueva imagen de presión es mayor de un orden de magnitud en el método 2 (del orden de 0.7s) que en el primero (del orden de 0.01s). Es decir, pese a que el método 2 obtiene un índice de aciertos mayor que el primero, esta diferencia no resulta significativa en comparación la diferencia de tiempo de ejecución de ambos clasificadores. Por lo tanto, se puede concluir que, para llevar a cabo la clasificación entre humanos y objetos, resulta más apropiado el uso del método 1.

Actualmente se están llevando a cabo nuevos experimentos que permitan, no sólo distinguir si el contacto se realiza con un humano o no, si no ser capaces de detectar, en el caso de que el contacto se realice con un humano, la parte del cuer-

po concreta que se está tocando. Futuros trabajos consistirán en utilizar algoritmos basados en gradientes de presión y palpación activa. Asimismo, se pretende observar el comportamiento de ambos métodos en un entorno de desastre simulado en el que las subclases de objetos sean las típicas de estas situaciones, como piedras o ramas por ejemplo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto DPI2015-65186-R y por la ayuda BES-2016-078237 del fondo social europeo FSE.

Referencias

- [1] Baishya, S. S. and Bauml, B. (2016). Robust material classification with a tactile skin using deep learning. In *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 8–15. IEEE.
- [2] Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., and Van Gool, L. (2008). Speeded-Up Robust Features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding*, 110(3):346–359.
- [3] Cortes, C. and Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, 20(3):273–297.
- [4] García-Cerezo, A., Mandow, A., Martínez, J. L., Gómez-de Gabriel, J., Morales, J., Cruz,

- A., Reina, A., and Serón, J. (2007). Development of ALACRANE: A mobile robotic assistance for exploration and rescue missions. In *SSRR2007 - IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics Proceedings*, pages 1–6. IEEE.
- [5] Jia, Y., Shelhamer, E., Donahue, J., Karayev, S., Long, J., Girshick, R., Guadarrama, S., and Darrell, T. (2014). Caffe. *Proceedings of the ACM International Conference on Multimedia - MM '14*, 1436:675–678.
- [6] Krizhevsky, A., Sutskever, I., and Hinton, G. E. (2012). ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks.
- [7] Liu, Y. and Nejat, G. (2013). Robotic Urban Search and Rescue: A Survey from the Control Perspective. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 72(2):147–165.
- [8] Lowe, D. (1999). Object recognition from local scale-invariant features. In *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, pages 1150–1157. IEEE.
- [9] Luo, S., Liu, X., Althoefer, K., and Liu, H. (2015a). Tactile object recognition with semi-supervised learning. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, volume 9245, pages 15–26. Springer, Cham.
- [10] Luo, S., Mou, W., Althoefer, K., and Liu, H. (2015b). Novel Tactile-SIFT Descriptor for Object Shape Recognition. *IEEE Sensors Journal*, 15(9):5001–5009.
- [11] Luo, S., Mou, W., Althoefer, K., and Liu, H. (2016). Iterative Closest Labeled Point for Tactile Object Shape Recognition. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE.
- [12] Murphy, R. R., Tadokoro, S., Nardi, D., Jacob, A., Fiorini, P., Choset, H., and Erkmen, A. M. (2008). Search and Rescue Robotics. In *Springer Handbook of Robotics*, pages 1151–1173.
- [13] Ranasinghe, A., Sornkarn, N., Dasgupta, P., Althoefer, K., Penders, J., and Nanayakkara, T. (2016). Salient Feature of Haptic-Based Guidance of People in Low Visibility Environments Using Hard Reins. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 46(2):568–579.
- [14] Schmitz, A., Bansho, Y., Noda, K., Iwata, H., Ogata, T., and Sugano, S. (2014). Tactile object recognition using deep learning and dropout. *2014 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pages 1044–1050.
- [15] Vidal-Verdú, F., Barquero, M. J., Castellanos-Ramos, J., Navas-González, R., Sánchez, J. A., Serón, J., and García-Cerezo, A. (2011). A Large Area Tactile Sensor Patch Based on Commercial Force Sensors. *Sensors*, 11(12):5489–5507.
- [16] Wang, Y. and Cottrell, G. W. (2015). Bikers are like tobacco shops, formal dressers are like suits: Recognizing urban tribes with caffe. In *Proceedings - 2015 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, WACV 2015*, pages 876–883. IEEE.

Planificación para interceptación de objetivos: Integración del Método Fast Marching y Risk-RRT

David Garzón-Ramos, Mario Garzón y Antonio Barrientos

Centro De Automática y Robótica UPM-CSIC

Calle José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid, España

dgarzon@etsii.upm.es, ma.garzon@upm.es, antonio.barrientos@upm.es

Resumen

Este artículo presenta un nuevo enfoque para la interceptación de objetivos móviles en escenarios complejos y de gran tamaño. El planificador para interceptación se basa en el algoritmo Risk-RRT. Para mejorar el desempeño del algoritmo original se ha realizado la adaptación e integración de técnicas basadas en el Método de Fast Marching. Las modificaciones realizadas han permitido integrar de forma efectiva la información del entorno dentro del planificador y mejorar sus capacidades. La integración completa es capaz de planificar on-line y seguir la trayectoria, al mismo tiempo que ejecuta las funciones de interceptación y evasión de obstáculos.

Palabras clave: Fast Marching Method, Planificación para Interceptación, Risk-RRT.

1 Introducción

Mejorar las capacidades de sistemas para vigilancia autónoma de infraestructuras es una tarea sobre la que se ha puesto gran atención en los últimos años. En este ámbito, el desarrollo de metodologías para el seguimiento e interceptación de objetivos móviles empleando vehículos terrestres no tripulados (UGV) es una tarea que se muestra prometedora en aplicaciones de seguridad y defensa. Existen diversos retos asociados al diseño e implementación de estas funcionalidades en sistemas robotizados, sin embargo, es posible destacar cuatro líneas principales de interés: detección y localización del objetivo, identificación y predicción de su trayectoria, planificación de una ruta para interceptarlo y finalmente, la ejecución de la trayectoria. El trabajo presentado en este artículo se enfoca en mejorar las etapas de predicción y planificación y se espera que pueda ser empleado en tareas de vigilancia de infraestructuras críticas de gran escala.

El objetivo principal de este trabajo es realizar una mejora de algoritmo planificación para interceptación desarrollado por Garzón *et. al.* [1] mediante la integración de mapas de distancia

creados utilizando el Método de Fast Marching (FMM) [10], en un planificador basado en Rapidly-exploring Random Trees (RRT) [5]. El sistema original propuso un algoritmo para la interceptación de objetivos utilizando UGV's, con capacidad de evasión de obstáculos estáticos y dinámicos. Entre las ventajas de este algoritmo se pueden nombrar su completo acople a la arquitectura de navegación de robots móviles terrestres y que permite la incorporación de nuevas fuentes de información gracias a su diseño modular. El desarrollo presentado en este trabajo mantiene dichas características a la vez que mejora su rendimiento y adaptabilidad al agregarle una nueva capa de información.

Otros trabajos anteriores han buscado optimizar las capacidades de algoritmos basados en RRT mediante el Método de Fast Marching (FMM). Estos trabajos enfocan su desarrollo en los llamados Fast Marching Trees [2, 3]. Este tipo de algoritmo difiere de la implementación convencional de RRT debido a que emplea las capacidades del FMM para calcular, de forma recursiva, la distancia de recorrido entre nodos, en lugar de la distancia euclidiana normalmente utilizada. Así, busca generar trayectorias más cercanas al desplazamiento real del robot. El gran problema de esta implementación es que ejecuta de forma exhaustiva el FMM sobre cada nodo y esto tiene un coste computacional muy elevado.

Este artículo es el resultado de primeros estudios para optimizar el funcionamiento del algoritmo Risk-RRT en tareas de interceptación de intrusos, orientado a su aplicación en la protección de infraestructuras críticas. LA principal novedad del trabajo aquí presentado es la integración del FMM, que en este caso se hace mediante la inclusión global la información del mapa sobre todo el árbol, en lugar de realizarlo de forma local en cada nodo. La ejecución del FMM se realiza desde la posición del objetivo a interceptar para obtener la distancia desde ese punto a cualquier lugar en el escenario. De esta forma, dicha información puede ser aprovechada para estimar de forma correcta la distancia de cualquier nodo del árbol hasta la posición del objetivo y adicionalmente para pre-

decir las posibles rutas que este va a emplear para desplazarse.

El trabajo se estructura de la siguiente forma: en la sección 2 se hace una descripción del algoritmo de interceptación basado en Risk-RRT. En la sección 3 se detalla la implementación del Método de Fast Marching. La sección 4 resume la obtención del mapa para la predicción de rutas. En la sección 5 se describe la integración de los algoritmos. La sección 6 muestra los experimentos y resultados y finalmente en la sección 7 se dan las conclusiones.

2 Interceptación de objetivos móviles mediante Risk-RRT

Risk-RRT es una estrategia de planificación propuesta en [4], la cual ha sido diseñada para operar en escenarios dinámicos y en presencia de incertidumbre. En esta, el riesgo de colisión es calculado usando modelos probabilísticos que representan objetos estáticos y dinámicos. El proceso usado para buscar las trayectorias óptimas se basa en una extensión del algoritmo Rapidly-exploring Random Tree (RRT) [5].

En el algoritmo Risk-RRT, el riesgo de colisión puede ser definido como la probabilidad de que el robot choque con algún obstáculo si desde el estado actual es aplicada una acción de control determinada. Con un entorno previamente conocido y representado por celdas de ocupación, la probabilidad de colisión con obstáculos estáticos está definida por la cercanía de los estados alcanzables por el robot a una celda marcada como ocupada. Por este motivo, la probabilidad de colisión en dichas celdas no cambia en el tiempo. En cambio, en presencia de obstáculos dinámicos, la probabilidad de colisión se extiende desde la posición instantánea del obstáculo en t_0 hasta la posible posición que ocupará en t_n .

En trabajos anteriores se han realizado modificaciones de este algoritmo que aprovechan la estimación del riesgo de colisión con un objeto móvil con el fin de determinar la ruta óptima para interceptarlo. Siendo esta una implementación del algoritmo RRT, la ruta es extraída de un árbol de configuraciones alcanzables por el robot. Los nodos del árbol, o puntos de paso del robot, son seleccionados de acuerdo peso ponderado entre la probabilidad de colisión con el objetivo móvil y la longitud estimada de la trayectoria. Una completa descripción de este trabajo puede ser encontrada en [1].

A pesar de los prometedores resultados de la técnica, existen inconvenientes asociados a la falta de integración del algoritmo con el entorno en

donde se desarrolla. El primer problema se presenta en la estimación de las distancias, en donde se emplea la distancia euclídea para calcular la distancia más corta entre un nodo y el objetivo móvil. El segundo problema está asociado al uso de modelos probabilísticos para la predicción del desplazamiento del objetivo móvil que no toma en cuenta su localización en el espacio. En ambos casos no se toma en cuenta la presencia de obstáculos en el entorno, lo que fácilmente se traduce en la aparición de soluciones con mínimos locales en la planificación y estimaciones de la probabilidad que no pueden ser extendidas a largos periodos de tiempo.

A las secciones posteriores se expone la implementación del Método Fast Marching y una primera aproximación para solucionar estas problemáticas mediante la combinación del algoritmo Risk-RRT con el Método Fast Marching.

3 Método Fast Marching

El Método de Fast Marching (FMM) es una técnica para seguir la evolución de un frente de onda que se expande en un medio viscoso. En este sentido, el frente de onda será una curva que separa el medio en una región interior y exterior, cuya evolución en el tiempo corresponde a un desplazamiento en la dirección normal al frente de onda. En el algoritmo original, el medio se considera isotrópico y la velocidad de expansión está determinada por la magnitud de la velocidad de desplazamiento en el medio, la cual no necesariamente es constante pero siempre debe ser positiva. Las variaciones del algoritmo original[6] modelan la velocidad de traslado con magnitud y dirección, considerando así modelos anisotrópicos del espacio, en donde el frente de onda evoluciona de distintas formas según sea su dirección de movimiento. Una velocidad de desplazamiento de cero, indica la imposibilidad del movimiento de la onda por dicho punto, tanto en el modelo isotrópico como en el anisotrópico.

En un punto dado, el movimiento del frente de onda esta descrito por la ecuación Eikonal:

$$\|\nabla T(x)\| F(x) = 1 \quad (1)$$

en donde T es el tiempo de llegada del frente en un punto x y $F \geq 0$ es la velocidad del frente en el punto x . Dado que el frente de onda únicamente se puede expandir, existe un valor único para T . En los siguientes apartados se describen los pasos previos a la construcción del mapa FMM, así como el algoritmo empleado para realizar la expansión de onda.

3.1 Mapa de Costos

El primer paso para realizar la implementación del algoritmo FMM es obtener una representación del espacio que se ajuste al model de interceptación de objetivos. Con este fin se construye un mapa de costos el cual corresponde a una representación modificada del escenario original y que además incluye información sobre la dificultad de desplazarse sobre un espacio determinado en el mapa.

Primero, se emplea una transformación de la distancia para añadir costos fijos sobre las trayectorias que pueden ser seguidas por los objetivos a interceptar o los robots. En el caso de los objetivos, esta técnica es empleada para modelar el comportamientos de evasión de obstáculos y con preferencia a permanecen distanciados de las paredes. De igual forma, los robots emplean esta información para establecer rutas seguras de desplazamiento, evitando riesgos de colisión. La transformación de la distancia se traduce en un gradiente en la escala de grises que rodea los obstáculos y paredes, con valor máximo alcanzado en las cercanías de los objetos y con un decrecimiento constante en la dirección normal del objeto, hasta alcanzar una extensión de seguridad mínima que se define de forma predeterminada. De este modo, en todos los procesos asociados al FMM se toma en cuenta la planificación de rutas con evasión de obstáculos tanto de los robots como de los objetivos.

Dado que la función del mapa de costos es brindar una representación del mapa que se ajusta a la tarea en desarrollo, en este caso también se contempla una etapa de escalado sobre el tamaño del mapa original. Este cambio en el mapa permite añadir o extraer pixeles de la imagen con el fin de optimizar ciertos procesos, sin que sea alterada en gran medida su composición general.

El proceso de escalado se realiza mediante un algoritmo de interpolación bilineal, que asegura que la posición en el mapa resultante tenga una correcta traducción que el mapa original. Cuando la imagen es escalada, a cada pixel original se le asigna uno o varios pixeles en la gráfica nueva, según el factor de escala deseado. Este método permite determinar el valor de intensidad del nuevo pixel, a través de una media ponderada de las intensidades de los pixeles conocidos en una vecindad de grados. En el Algoritmo 1 se resume el proceso de construcción del mapa de costos.

A partir del vector $Vm\{0, 1, \dots, k\}$, que representa las celdas de ocupación del mapa, se obtiene un nuevo vector $Cm\{0, 1, \dots, r\}$ en donde r esta definido por el factor de escala C que relaciona la distancia en metros representada por cada pixel

Algorithm 1 Construcción del mapa de costos

Require: Vector $Vm\{0, 1, \dots, k\}$

Require: Factor de escala (C) & distancia de seguridad (d_s).

Ensure: Vector $Cm\{0, 1, \dots, r\}$; $r = S_x k$

```

1: for  $i \leq k$  do
2:    $r = \text{función de escalado}(k, S)$ .
3:    $Cm(r) = \text{transformación de distancia}$ 
      $(Vm(k), d_s)$ .
4:    $r = r + 1$ .
5: end for
```

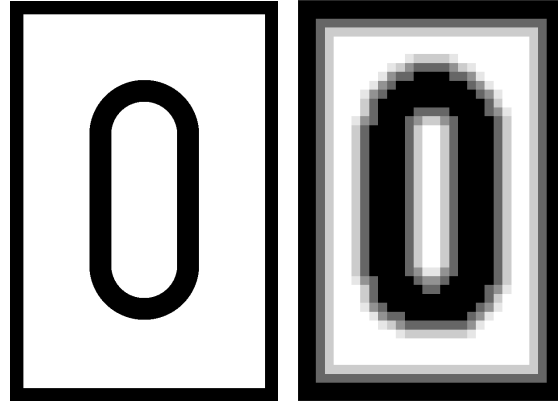


Figura 1: Variaciones de escala y distancia de seguridad en la construcción del mapa de costos.

en Vm y la distancia en metros deseada para Cm . De igual forma, se emplea la distancia de seguridad d_s para asignar un nivel de intensidad entre 0 y 100 a los pixeles que se encuentran en cercanías a obstáculos dentro del mapa.

En la Figura 1 se muestra la representación en forma de mapa de costos de un escenario arbitrario cuando es sometido al proceso de escalamiento y de transformación de la distancia. La variación de escala se ha realizado con $0.1m$ y $2m$ por pixel, y la distancia de seguridad con valores de 0 y $5m$. Se puede observar que aunque la resolución se ha reducido en más de un orden de magnitud, la imagen conserva su morfología y características más representativas. El efecto más notable de la reducción de la resolución, se evidencia en la incapacidad de generar una transformación de la distancia adecuada. Al reducir el número de pixeles por metro, disminuyen también la cantidad de intensidades de gris que pueden ser incluidas en el área de seguridad. Este efecto es poco deseado en los sistemas de navegación ya que supone un cambio brusco en la velocidad de movimiento.

3.2 Mapa de velocidades

A continuación el mapa de costes es ajustado al modelo de entrada del FMM. La información re-

querida para ejecutar el algoritmo es un mapa de velocidades, por este motivo el mapa de costos obtenido anteriormente es transformado al espacio de la velocidad en donde a cada pixel dentro del vector $Cm\{0, 1, \dots, r\}$ se le asigna un nuevo valor mediante la expresión:

$$W(r) = \frac{Cm(r)}{\max(Cm)} \quad (2)$$

En donde $W(r)$ simboliza la velocidad en el pixel r dentro del mapa de velocidades W . $Cm(r)$ representa el costo del desplazamiento en dicho pixel y $\max(Cm)$ corresponde al máximo valor en el mapa de costos. De este modo, la velocidad que puede ser alcanzada por la onda propagándose en un punto del mapa es inversamente proporcional al costo que supone desplazarse por ese punto. Suponiendo una velocidad máxima constante, las zonas totalmente libres de obstáculos obtendrán una velocidad máxima igual a 1 y aquellas que se encuentran ocupadas reciben una velocidad de 0 dado que es imposible desplazarse a través de ellas. En este caso, se ve reflejado el comportamiento de peatones en donde estos se mueven continuamente con velocidad constante en las áreas libres y sólo disminuyen su avance cuando se encuentran cerca de paredes u obstáculos.

3.3 Implementación de FMM

Dado que el algoritmo Risk-RRT se encuentra desarrollado para Robot Operating System (ROS). En este trabajo se ha realizado una adaptación para ROS de las librerías correspondientes a la Fast Marching Toolbox de Matlab®, desarrolladas por Gabriel Peyre¹. En esta implementación el algoritmo de FMM se ejecuta sobre un arreglo de celdas, correspondientes a los pixeles en una imagen, y asigna a cada pixel el tiempo de llegada del frente de onda según lo expuesto en la sección 3. De forma que, para un medio con igual velocidad de propagación en el espacio, la expansión de la curva resulta en círculos concéntricos que se alejan desde el origen hasta la distancia máxima que la onda puede recorrer dentro del mapa. En el Algoritmo 2 se describen los pasos empleados en la librería para realizar la expansión de onda mediante FMM.

En el Algoritmo 2 la función distanciaEikonal esta descrita por la expresión

Algorithm 2 Construcción del mapa FMM

Require: Vector $W\{0, 1, \dots, r\}$

Require: Posición inicial x_0 .

Ensure: Vector de distancias $D\{0, 1, \dots, r\}$.

```

1: Distancias  $D\{0, 1, \dots, r\} = \infty$ .
2: Estados  $S\{0, 1, \dots, r\} = \text{no visitados}$ .
3:  $D(x_0) = 0$  &  $S(x_0) = \text{visitado}$ .
4: repeat
5:   Busca  $\min(D)$  con  $S(\min(D)) = \text{no visitado}$ .
6:   Selecciona pixeles  $[n_{right}, n_{left}, n_{up}, n_{down}]$ 
     adyacentes a  $\min(D)$ .
7:    $S(\min(D)) = \text{visitado}$ .
8:   for all  $S(n_j) = \text{no visitado}$  do
9:      $D(n_j) = \text{distanciaEikonal desde } \min(D) \text{ a } n_j$ .
10:  end for
11: until  $S(0, 1, \dots, r) = \text{visitados}$ 

```

$$d = \begin{cases} \frac{d_x + d_y + \sqrt{\Delta}}{2} & \text{cuando } \Delta \geq 0, \\ \min(d_x, d_y) + W(\min(D)) & \Delta < 0 \end{cases} \quad (3)$$

En donde

$$d_x = \min(D(n_{right}, n_{left})) \quad (4)$$

$$d_y = \min(D(n_{up}, n_{down})) \quad (5)$$

y con

$$\Delta = (2 * W(\min(D))) - (d_x - d_y)^2 \quad (6)$$

Los valores contenidos en el vector de distancias $D\{0, 1, \dots, r\}$ están definidos por la velocidad de expansión en el vector $W\{0, 1, \dots, r\}$. Si dichos valores son normalizados en $D_{norm}\{0, 1, \dots, r\}$, obtiene un valor proporcional a la normalización del tiempo de llegada de la onda a cualquier posición en el mapa.

En este sentido se generan tres tipos de valores según el tiempo requerido para alcanzar cualquier posición.

En el lugar en que se inicia la propagación del algoritmo FMM se tiene que $t = 0$. Dado que es la posición inicial, es alcanzada en el tiempo 0.

Luego se encuentran los valores comprendidos entre $0 < t < 1$, que son los tiempos necesarios para alcanzar cualquier posición en el mapa, en donde el valor más cercano a 1 corresponde a la posición más lejana respecto al punto de inicio del algoritmo.

Finalmente está el caso en que $t = 1$, este valor se reserva para las posiciones que se encuentran

¹ <http://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6110-toolbox-fast-marching>

ocupadas o no pueden ser alcanzadas. En estos puntos la velocidad W es cero y por tanto, los tiempos de llegada tienden al infinito. Por esta razón son acotados y se les asigna el valor de 1.

Este proceso se realiza asegurando que se mantienen los protocolos de datos empleados en los mapas de ROS, en donde para $D_{norm}(r) = 1$ el valor asignado para en el mapa de tiempos es $T(r) = 100$ y para $D_{norm}(r) < 1$ se calcula mediante la expresión

$$T(r) = 99 * \left(\frac{D(r)}{\max(D/D! = 1)} \right) \quad (7)$$

En su forma básica, el FMM recorre los píxeles de igual forma que se realiza en el algoritmo de Dijkstra, sin embargo, gracias a que las distancias entre píxeles son calculadas mediante la solución de la ecuación Eikonal, se logran eliminar efectos asociados a la fuerte discretización de los otros métodos. Las diferencias entre la forma de expansión y los efectos de discretización pueden ser estudiados en [7].

En la Figura 2 se muestra el mapa $T\{0, 1, \dots, r\}$, obtenido mediante el algoritmo FMM, en diferentes escenarios y con diferentes posiciones de origen. En la imagen, los píxeles azules indican posiciones temporalmente cercanas al punto de inicio, los píxeles rojos señalan aquellos que se encuentran más lejos, y por último, los píxeles amarillos muestran las posiciones inalcanzables. Es posible observar como en la figura inferior el escenario real tiene una variación menos uniforme de los tiempos en comparación a los mapas sintéticos de la figura superior, esto es causado por las zonas de baja densidad de píxeles en los extremos del mapa, en donde el costo de desplazamiento se incrementa y por tanto se disminuye en forma considerable la velocidad de movimiento en ese punto. En consecuencia, los tiempos para alcanzar dichos puntos, crecen notoriamente y alteran la normalización de $T\{0, 1, \dots, r\}$, causando que el resto del escenario se mantenga con un valor de tiempo más cercano al cero.

4 Mapa de predicción de trayectorias

El segundo inconveniente del algoritmo Risk-RRT a tratar en este trabajo es la obtención de una representación probabilística para la predicción de trayectorias que tome en cuenta la disposición de los obstáculos en el mapa. En el trabajo original [1] se emplea un modelo de predicción basado en el procesamiento de la trayectorias mediante el filtro de Kalman [8]. Dado que en este cálculo solo se incluye la información de la trayectoria seguida por

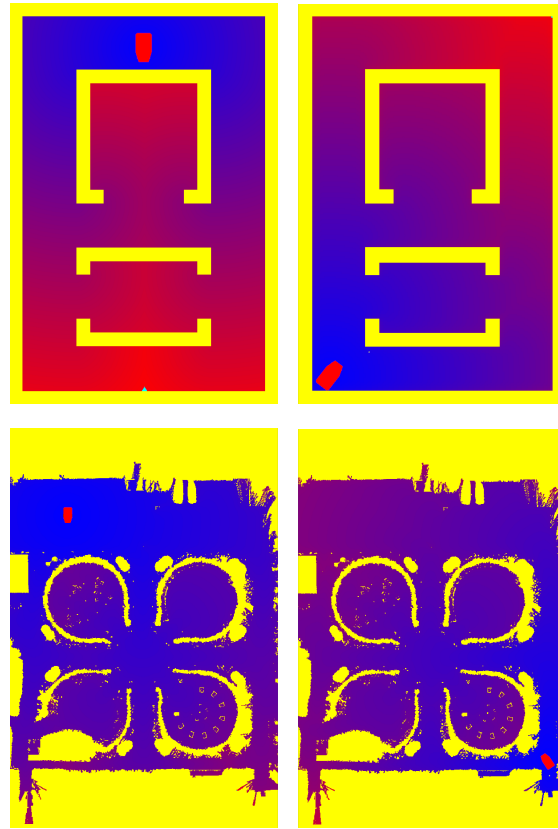


Figura 2: Mapas de tiempo obtenidos mediante FMM.

el objetivo, la predicción no puede lidiar con cambios considerables de dirección. Por este motivo se hace inviable para realizar predicciones a largo plazo y/o en escenarios de complejidad elevada.

Con el fin de optimizar la predicción a largo plazo, se ha integrado un mapa de probabilidades que representa la probabilidad de desplazamiento del objetivo desde su posición instantánea hacia cualquier posición en el mapa. El mapa de probabilidades ha sido obtenido mediante una técnica de predicción de desplazamiento de peatones que a través de la generación de grafos es capaz de estimar la probabilidad para todas las rutas posibles que recorren el mapa desde la posición del objetivo. Este algoritmo es una extensión del algoritmo FMM y aprovecha las operaciones detalladas en la sección 3 para realizar las predicciones. Para profundizar en la descripción de este algoritmo es posible referirse a [9].

De este modo el componente probabilístico de la selección de nodos en el algoritmo Risk-RRT no solo está basado en la trayectoria actual del objetivo si no que toma en consideración la estructura morfológica del escenario.

5 Integración en Risk-RRT

Como se ha mencionado anteriormente, el algoritmo RRT asigna un peso para cada nodo del árbol (i.e. cada configuración del espacio de búsqueda). Cuando el árbol se completa o el tiempo para la planificación se termina, el nodo con el mayor peso se selecciona como la próxima meta y la trayectoria para alcanzarlo se extrae del árbol.

La integración de los algoritmos presentado se basa justamente en la asignación de pesos a las configuraciones del árbol, teniendo en cuenta la información obtenida a partir del algoritmo FMM y el mapa de probabilidades expuestos en secciones anteriores.

La primera modificación radica en que la distancia entre los nodos y el objetivo no se calcula mediante la distancia euclídea entre ambos. En su lugar, los nodos obtienen la distancia del mapa de distancias que resulta de emplear el algoritmo FMM descrito en la sección 3. Así las ventajas de baja discretización y la no existencia de mínimos locales son extendidas en la construcción del árbol.

El segundo punto de optimización del algoritmo busca extender sus capacidades de predicción. Con este fin se ha añadido el mapa de probabilidades de la sección 4 en el cálculo de los pesos del nodo. Añadir una componente de predicción a largo plazo en la selección de la ruta mejora las capacidades de respuesta del árbol en escenarios de alta complejidad y distancias elevadas. La mayor ventaja en este caso radica en que la predicción se realiza sobre todas las rutas posibles para alcanzarlo.

6 Experimentos y Resultados

Para demostrar la capacidad de integración de los algoritmos se ha fijado un escenario en el que un robot debe interceptar un objetivo señalado en el mapa. En la Figura 3 se muestra la planificación de trayectorias del algoritmo RRT con diferentes configuraciones de funcionamiento y la posiciones del robot y del objetivo señaladas con iconos de color azul y rojo respectivamente. El mayor reto de este experimento está representado por la configuración del escenario y la posición inicial del robot. Este se ha ubicado en un mínimo local y a su vez, la posición del objetivo se ha dejado estática para apreciar con más claridad los efectos de las diferentes etapas de integración de los algoritmos.

En la primera fila se muestran tres instantes de tiempo de la planificación realizada por el algoritmo original. Se puede observar que por sí solo

el algoritmo no es capaz de resolver fácilmente el problema de salir del mínimo local, dado que su nodo más probable está determinado por la distancia euclídea y no toma en cuenta la presencia de obstáculos. Para resolver este problema es posible modificar la parametrización del algoritmo Risk-RRT para generar un árbol con mayor distancia entre nodos o una apertura mayor del mismo. Sin embargo, cuando se aumenta la distancia mínima entre nodos se pierde resolución en la navegación del robot y se genera dificultades al maniobrar en pasillos pequeños. Por otro lado, cuando el problema se intenta resolver aumentando indiscriminadamente la extensión del árbol se genera un costo computacional muy elevado.

En la segunda fila se muestra la integración del algoritmo de RRT con el mapa $T\{0, 1, \dots, r\}$ obtenido de FMM. Manteniendo la configuración inicial del árbol en el algoritmo original se puede apreciar como el cambio de la distancia euclídea a por una distancia de recorrido mejora sustancialmente el desempeño del algoritmo, llevándolo a una solución satisfactoria para alcanzar el objetivo. En este punto se encuentra también un crecimiento más rápido del árbol ocasionado por la supresión de los cálculos de distancia euclídea en la generación de cada nodo. Como se mencionó anteriormente, la existencia de un solo mínimo global en la expansión del mapa obtenido mediante FMM permite al robot salir fácilmente del mínimo local alcanzado con el algoritmo original y encontrar una trayectoria adecuada.

Finalmente, en la última fila se muestra el comportamiento obtenido en la expansión del árbol cuando se añade el peso del mapa de probabilidades. En las figuras, una probabilidad más alta se muestra como zonas de mayor claridad, en contraste con zonas de menor probabilidad con colores más oscuros. Se ha dado un pequeño incremento a la probabilidad de que el objetivo se desplace por la ruta de la izquierda, esto con el fin de clarificar el comportamiento del árbol en presencia de bifurcaciones. En las figuras se muestra como la expansión del árbol se realiza en su mayoría en la zona mayor probabilidad al alcance del robot. Esto permite al algoritmo concentrar los recursos computacionales en el descubrimiento de rutas en las zonas en que es más probable interceptar el objetivo en relación a las posibles rutas por las que este se puede desplazar.

Este es un primer paso en la implementación de técnicas basadas en FMM para la optimización de las tareas de interceptación de objetivos en la protección de infraestructuras críticas. El alcance de este trabajo está limitado a demostrar la factibilidad de la optimización de la tarea de in-

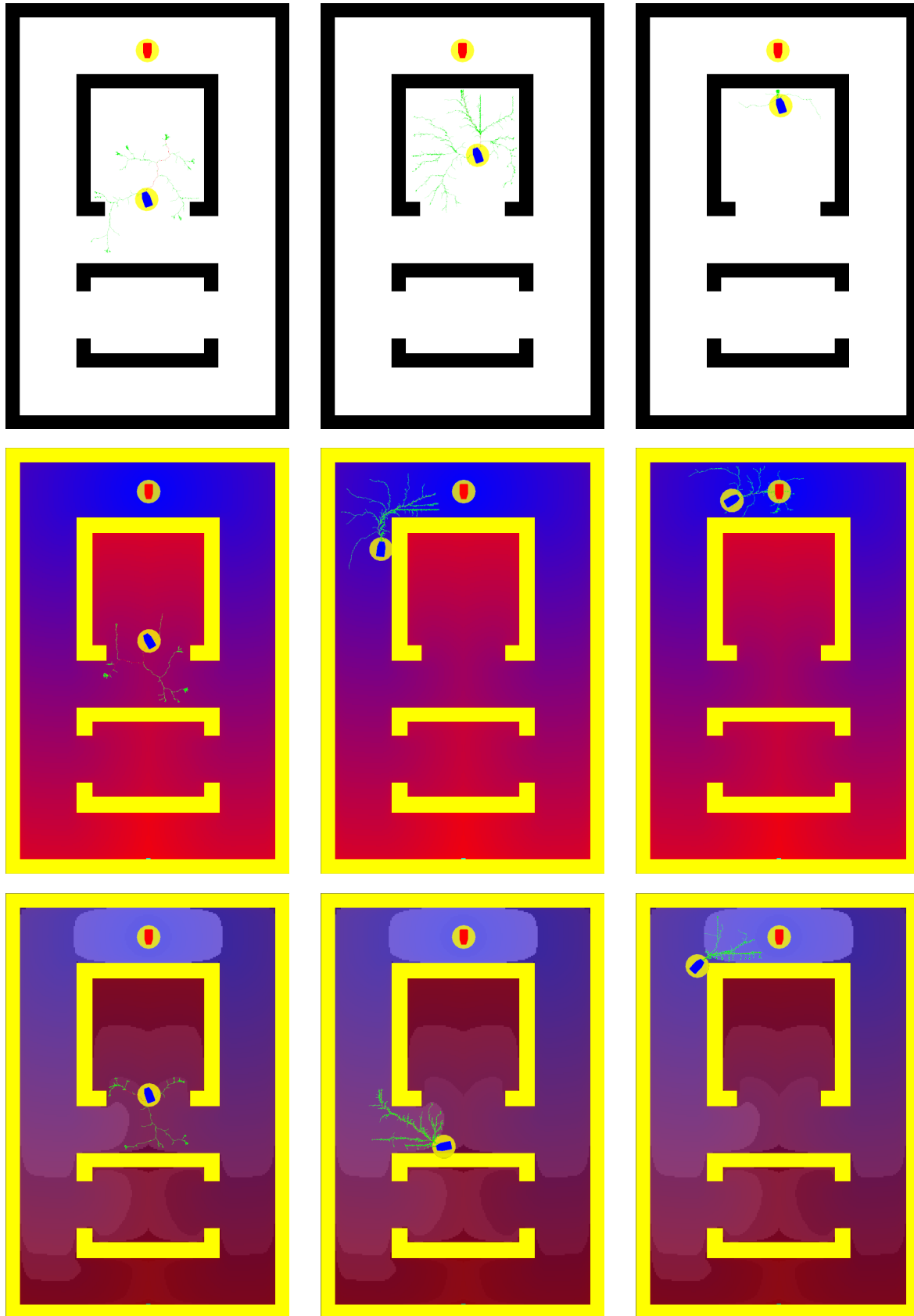


Figura 3: Trayectorias obtenidas con RRT, RRT+FMM y RRT+FMM+Predicción

terceptación realizada por el algoritmo Risk-RRT. Trabajos posteriores se dedicarán a la obtención de resultados cuantitativos sobre la integración propuesta.

7 Conclusiones

Se comprobó la compatibilidad y buena integración del algoritmo Risk-RRT, el Método de Fast Marching y la predicción de trayectorias basada también en FMM. Los algoritmos comparten la misma información de entrada y no requieren consideraciones adicionales para su funcionamiento conjunto.

Se ha demostrado como la inclusión intrínseca de la información aportada por el escenario mejora en gran medida el comportamiento del algoritmo Risk-RRT. Se encontró que la información aportada por el mapa en el algoritmo original es escasa y solo permite realizar las tareas de evasión de obstáculos. Al reemplazar dicho mapa con el mapa obtenido de FMM se logró incluir información relevante para resolver situaciones con mínimos locales sin tener que modificar la etapa de planificación. También, la inclusión adicional del mapa de probabilidades ha permitido mejorar el desempeño del algoritmo en situaciones de predicción de largo alcance.

Finalmente se han logrado demostrar la potencialidad del algoritmo Risk-RRT para desempeñar tareas de interceptación de objetivos. Las modificaciones realizadas permitirán desarrollar trabajos futuros que incluyan la integración de mapas con nuevos modelos probabilísticos e información de interés en la selección de la ruta óptima.

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente apoyado por el Grupo de Robótica y Cibernética de la Universidad Politécnica de Madrid (España), siendo financiado por los proyectos: PRIC (Protección robotizada de Infraestructuras Críticas; DPI2014-56985-R), patrocinado por el Ministerio español de Economía y Competitividad y RoboCity2030-III-CM (Robótica aplicada a la Mejora de la Calidad de Vida de los Ciudadanos fase III; S2013 / MIT-2748), financiado por Programas de Actividades de I + D en la Comunidad de Madrid y cofinanciado por Fondos Estructurales de la UE.

Referencias

- [1] Garzón, M., Fotiadis, E.P., Barrientos, A., Spalanzani, A. (2014). RiskRRT-Based Planning For Interception of Moving Objects in Complex Environments. In ROBOT2013: First Iberian Robotics Conference. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 253. Springer, Cham.
- [2] Janson, L., Schmerling, E., Clark, A., & Pavone, M. (2015). Fast marching tree: A fast marching sampling-based method for optimal motion planning in many dimensions. The International journal of robotics research, 34(7), 883-921.
- [3] Starek, J., Schmerling, E., Janson, L., & Pavone, M. (2014). Bidirectional fast marching trees: An optimal sampling-based algorithm for bidirectional motion planning. In Workshop on Algorithmic Foundations of Robotics.
- [4] Fulgenzi, C., Spalanzani, A., Laugier, C., & Tay, C. (2010). Risk based motion planning and navigation in uncertain dynamic environment.
- [5] LaValle, S. M., & Kuffner Jr, J. J. (2001). Randomized kinodynamic planning. The International Journal of Robotics Research, 20(5), 378-400.
- [6] Petres, C., Pailhas, Y., Petillot, Y., & Lane, D. (2005, June). Underwater path planning using fast marching algorithms. In Oceans 2005-Europe (Vol. 2, pp. 814-819). IEEE.
- [7] Peyré, G. (2011). The numerical tours of signal processing. Computing in Science & Engineering, 13(4), 94-97.
- [8] Garzón, M., Garzón-Ramos, D., Barrientos, A. & Cerro, J. (2016). Pedestrian Trajectory Prediction in Large Infrastructures - A Long-term Approach based on Path Planning. In Proceedings of the 13th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, 381-389.
- [9] Garzón Ramos, D. A., Garzón Oviedo, M., & Barrientos Cruz, A. (2016). Pedestrian Motion Prediction: A Graph Based Approach.
- [10] Sethian, James A. (1996). A fast marching level set method for monotonically advancing fronts. Proceedings of the National Academy of Sciences, 93(4), 1591-1595.

ESTABILIZACIÓN DE UNA BOLA SOBRE UN PLANO UTILIZANDO UN ROBOT PARALELO 6-RSS

Daniel González Lluís Ros Federico Thomas
 Institut de Robòtica i Informàtica Industrial, UPC-CSIC
 Llorens Artigas 4-6, 08028 Barcelona, Spain

Resumen

Una bola rodando sobre un plano constituye un sistema no lineal cuya estabilización suele utilizarse en el campo de la ingeniería de control con propósitos de investigación y educativos. En las implementaciones habituales, la inclinación del plano se controla con dos motores, y la posición de la bola se detecta con una cámara o un sensor táctil que cubre el plano. Sin embargo, una actuación basada en un robot paralelo con 6 grados de libertad aumenta notablemente las posibilidades del sistema. En primer lugar, un robot como el mencionado permite rotar el plano con respecto a un eje instantáneo arbitrario del espacio; y, en segundo lugar, la utilización de sensores de fuerza en las seis cadenas serie del robot permite localizar la posición de la bola con precisión, sin tener que recurrir a sensores táctiles o cámaras externas. Basándonos en una formulación de la cinestática del problema que utiliza la teoría de torsos, en este artículo mostramos cómo es posible derivar la relación entre las fuerzas y las velocidades en la plataforma y en los sensores y en los actuadores de forma simple y directa. A partir de esta formulación, se deriva un control basado en dos PIDs cuya efectividad es evaluada experimentalmente.

Palabras clave: Sistema bola sobre plano, teoría de torsos, robots paralelos.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas dinámicos basados en una bola rodante sobre una guía [10, 15] y su extensión a la bola rodante sobre un plano [7, 11, 12, 16] son fáciles de implementar y dan a los estudiantes e investigadores la oportunidad de ensayar diferentes estrategias de control. En ambos casos el desafío consiste en estabilizar la bola ya sea en un punto de la guía o del plano, lo cual implica que la posición de la bola sea conocida en todo momento por medio de sensores, para así modificar la posición y orientación de la guía o del plano por medio de actuadores [1, 9, 13].

Se han estudiado muchas estrategias de control

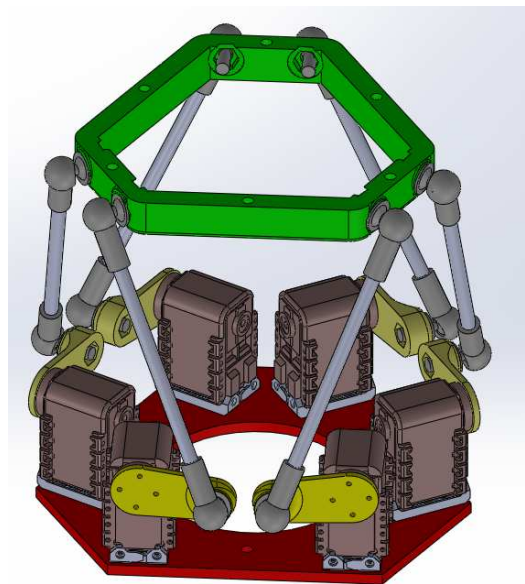


Figura 1: Diseño de un robot 6-RSS.

para este tipo de plantas, que incluyen, por ejemplo, el control de perturbaciones [16], el control difuso [7], el control por deslizamiento [12], o el control mediante redes neuronales [7].

En este trabajo no ahondaremos en el problemas del control sino en el diseño e implementación de la parte de actuación y sensado de la posición de la bola utilizando un robot paralelo. La utilización de una estructura paralela para el sensado del torzor de fuerzas aplicadas sobre una plataforma no es nueva [8] y puede ser utilizada, en el caso particular del problema tratado, para la localización de una bola sobre un plano.

Nos hemos decantado por la utilización de un robot paralelo con topología 6-RSS, una variante de la bien conocida plataforma de Gough-Stewart, por la simplicidad con que puede ser implementado utilizando motores de tipo servo. Este tipo de robots consiste en seis cadenas serie compuestas de una articulación de rotación actuada y anclada sobre una base fija y dos articulaciones esféricas, la última de las cuales está conectada a la plataforma móvil (véase la Fig. 1). Las seis articulaciones de

rotación actuadas de forma independiente proveen a la plataforma móvil de seis grados de libertad, haciendo posible que ésta ejecute cualquier tórso instantáneo de velocidad dentro de su espacio de trabajo.

Este trabajo se ha organizado de la siguiente manera. En primer lugar, en la Sección 2 se analiza la cinetostática del robot paralelo. Utilizando la teoría de tórsos, derivaremos las relaciones entre el tórso de velocidad en la plataforma y la velocidad angular de los motores, así como la relación entre el tórso de fuerza aplicado sobre la plataforma y la fuerza leída por los sensores. Esta formulación proporcionará el modelo utilizado para el control del sistema, tal como se describe en la Sección 3. A continuación, en la Sección 4 se describe la implementación del sistema hasta el punto en el que se encuentra en estos momentos y presenta algunos resultados experimentales ya obtenidos. Finalmente, la Sección 5 resume los puntos más importantes de este trabajo.

2. ANÁLISIS CINETOSTÁTICO

Para controlar el movimiento del robot se necesita el Jacobiano cinemático, que proporciona la relación entre la velocidad de la plataforma y las velocidades de los motores. Asimismo, para deducir la posición de la bola se requiere el Jacobiano estático, que proporciona el tórso de fuerza ejercido por la bola sobre la plataforma, dados los pares motor que lo equilibran. Este tórso tiene tres componentes de fuerza y tres de par y por tanto permite recuperar la recta de acción de la fuerza, y su punto de intersección con la plataforma. Obtendremos este punto y ambos Jacobianos constructivamente, apoyándonos en la teoría de tórsos y el principio de las potencias virtuales [5, 6].

2.1. ANÁLISIS DE LA VELOCIDAD

Sea $\hat{T} = [\omega^T, v_O^T]^T$ el tórso de velocidad absoluta de la plataforma, expresado en un sistema de referencia absoluto $\mathcal{A} = \{OXYZ\}$ anclado a la base (Fig. 2). En la expresión de \hat{T} , $\omega \in \mathbb{R}^3$ es la velocidad angular de la plataforma, y $v_O \in \mathbb{R}^3$ es la velocidad del punto de la plataforma que coincide instantáneamente con el origen O . Es bien sabido que este tórso se puede expresar como combinación lineal de los tórsos articulares que aparecen a lo largo de cada pata del robot [3, 5, 6]. Consideremos por ejemplo la pata i , esquematizada en la Fig. 2. Cada una de sus articulaciones esféricas es equivalente a tres articulaciones rotacionales de ejes copuntuales, con lo cual la pata se puede ver como un brazo serie formado por siete enlaces, que podemos numerar consecutivamente desde la base

(índice 0) hasta la plataforma (índice 7). Con esta convención, y utilizando la notación de Duffy [6], para la pata i podemos escribir

$$\hat{T} = \omega_{i,1} \hat{S}_{i,1} + \omega_{i,2} \hat{S}_{i,2} + \dots + \omega_{i,7} \hat{S}_{i,7}, \quad (1)$$

donde $\omega_{i,j}$ y $\hat{S}_{i,j}$ son la velocidad angular y el tórso de velocidad unitario del enlace $j+1$ relativos al enlace j de la pata. Nótese que en esta expresión $\omega_{i,1}$ es la velocidad angular del motor i , y $\hat{S}_{i,1}$ se puede ver como el vector de coordenadas de Plücker normalizadas del eje de este motor.

Escribiendo la Eq. (1) para las seis patas se obtiene un sistema de 36 ecuaciones lineales en 42 incógnitas que en principio ya se podría usar para resolver el problema cinemático inverso instantáneo (dado \hat{T} , obtener $\omega_{i,1}$ para $i = 1, \dots, 6$). Este sistema, sin embargo, está subdeterminado, y en realidad se puede simplificar mucho como vamos a ver, reduciendo así el tiempo de cálculo de la ley de control resultante. La simplificación se efectúa mediante el método del tórso recíproco [3, 6].

Sea \hat{w}_i el tórso unitario formado por las coordenadas de Plücker de la recta que pasa por los puntos B_i y C_i de la pata i . Este tórso tiene la forma

$$\hat{w}_i = \begin{bmatrix} e_i \\ r_i \times e_i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

donde e_i es un vector director unitario de la recta B_iC_i , y r_i es el vector de posición del punto B_i . Si ahora multiplicamos la Eq. (1) por \hat{w}_i^T , obtendremos

$$\hat{w}_i^T \cdot \hat{T} = \omega_{i,1} \cdot \hat{w}_i^T \hat{S}_{i,1} \quad (3)$$

puesto que todos los productos $\hat{w}_i^T \hat{S}_{i,j}$ son nulos para $j = 2, \dots, 7$. Esto es así porque la recta asociada a \hat{w}_i intersecta las rectas de los tórsos asociados a las rótulas esféricas. Debido a esta propiedad, se dice que \hat{w}_i es el tórso *recíproco* de la pata i .

Si ahora escribimos la Eq. (3) para todas las patas, obtendremos el siguiente sistema de ecuaciones

$$\underbrace{\begin{bmatrix} e_1 & \dots & e_6 \\ r_1 \times e_1 & \dots & r_6 \times e_6 \end{bmatrix}^T}_{\mathbf{A}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \omega \\ v_O \end{bmatrix}}_{\hat{T}} = \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{w}_1^T \cdot \hat{S}_{1,1} & & \\ & \ddots & \\ & & \hat{w}_6^T \cdot \hat{S}_{6,1} \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \omega_{1,1} \\ \vdots \\ \omega_{6,1} \end{bmatrix}}_{\gamma} \quad (4)$$

que podemos expresar de forma compacta como

$$\mathbf{A} \hat{T} = \mathbf{B} \gamma, \quad (5)$$

expresión que proporciona, directamente, la relación entre las velocidades de entrada y salida del

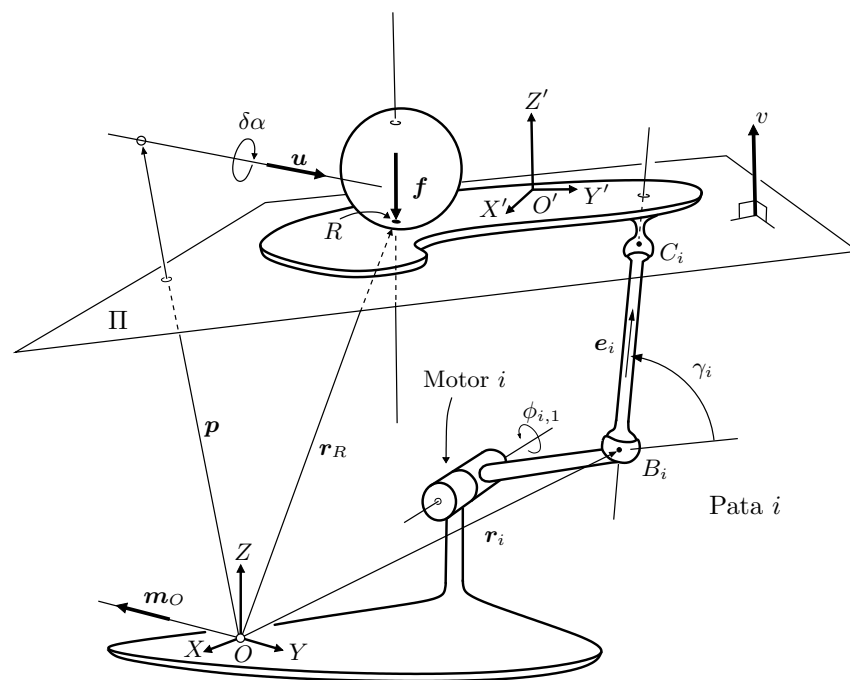


Figura 2: Elementos geométricos que intervienen en el análisis cinetostático del robot.

robot. Si ahora suponemos que $\det \mathbf{B} \neq 0$, podemos finalmente escribir la solución del problema cinemático instantáneo inverso como

$$\gamma = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{A} \hat{\mathbf{T}}. \quad (6)$$

Obsérvese que la matriz \mathbf{B} es diagonal, y sólo puede ser singular si alguno de los productos $\hat{\mathbf{w}}_j^T \cdot \hat{\mathbf{T}}_{j,1}$ se hace cero, lo cual sólo sucede cuando la recta $B_i C_i$ intersecta el eje del motor i . En tal situación, se dice que el robot se encuentra en una singularidad inversa, produciéndose una pérdida de destreza de la plataforma móvil [2–4]. Si bien esta situación podría darse en la práctica, en este trabajo evitaremos que ocurra limitando los ángulos γ_i entre el brazo del motor y la recta $B_i C_i$ a un subrango del intervalo $(0, \pi/2)$.

Fijémonos ahora que la Eq. (6) se puede multiplicar por un incremento infinitesimal de tiempo δt , dando lugar a la ecuación

$$\delta \phi = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{A} \delta \hat{\mathbf{D}}. \quad (7)$$

que proporciona los pequeños desplazamientos $\delta \phi$ que deben realizar los motores para generar un desplazamiento infinitesimal $\delta \hat{\mathbf{D}}$ de la plataforma. Esta es, precisamente, la ecuación a implementar en nuestro lazo de control.

Por un lado, el vector $\delta \phi$ tiene la forma

$$\delta \phi = [\delta \phi_1, \dots, \delta \phi_6], \quad (8)$$

siendo $\delta \phi_i$ el pequeño ángulo que debe girar el motor i . Por otro lado, en virtud del Teorema de

Chasles, el torsor $\delta \hat{\mathbf{D}}$ se puede descomponer como una rotación de ángulo infinitesimal $\delta \alpha$ en torno al eje instantáneo de rotación y deslizamiento de la plataforma, más una traslación infinitesimal de valor δd a lo largo de este eje. Sean \mathbf{u} un vector director unitario de este eje instantáneo, y \mathbf{p} el vector de posición de un punto cualquiera del eje. Entonces, la descomposición mencionada se puede escribir así

$$\delta \hat{\mathbf{D}} = \delta \alpha \cdot \delta \hat{\mathbf{D}}_r + \delta d \cdot \delta \hat{\mathbf{D}}_t, \quad (9)$$

donde

$$\delta \hat{\mathbf{D}}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{p} \times \mathbf{u} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix}, \quad \delta \hat{\mathbf{D}}_t = \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

En resumen, en cada iteración del lazo de control haremos lo siguiente:

1. A partir del error de posición de la bola, fijaremos el eje instantáneo alrededor del cual debe rotar la plataforma para corregir este error, y estableceremos los incrementos correctores $\delta \alpha$ y δd necesarios.
2. Obtendremos $\delta \hat{\mathbf{D}}$ usando la Eq. (9).
3. Determinaremos $\delta \phi = [\phi_1, \dots, \phi_6]^T$ mediante la Eq. (7).
4. Consignaremos los incrementos $\delta \phi_i$ obtenidos en cada uno de los seis motores.

2.2. ANÁLISIS DE LA FUERZA

Sea $\hat{\mathbf{w}}$ el torsor de fuerza que aplica la bola sobre la plataforma móvil. Puesto que el contacto de la bola con la plataforma es puntual, podemos suponer que $\hat{\mathbf{w}}$ codifica una fuerza pura \mathbf{f} aplicada en el punto de contacto R , de momento \mathbf{m}_O con respecto a O (Fig. 2). Es decir, $\hat{\mathbf{w}} = [\mathbf{f}^\top, \mathbf{m}_O^\top]^\top$. Veamos ahora como podemos deducir $\hat{\mathbf{w}}$ a partir de los pares equilibrantes ejercidos por los motores, y como se puede obtener la posición de R sobre el plano π de la plataforma a partir de los vectores \mathbf{f} y \mathbf{m}_O .

Supongamos que en un cierto instante la bola está aplicando el torsor $\hat{\mathbf{w}}$ sobre la plataforma, la cual, a su vez, se mueve bajo una cierta velocidad $\hat{\mathbf{T}}$. En ese instante, cada motor i del robot aplicará un par equilibrante τ_i para equilibrar $\hat{\mathbf{w}}$. Si asumimos que las patas y la plataforma tienen masa despreciable en comparación con la de la bola, es fácil aplicar el teorema de las potencias virtuales para deducir los Jacobianos de fuerza. A tenor del teorema, la potencia generada por $\hat{\mathbf{w}}$ bajo la velocidad $\hat{\mathbf{T}}$ debe ser igual a la potencia generada por los pares τ_i bajo las velocidades ω_i (se supone que las restricciones de enlace son ideales y no generan, en conjunto, potencia virtual neta). Es decir,

$$\hat{\mathbf{w}}^\top \cdot \hat{\mathbf{T}} = \boldsymbol{\tau}^\top \cdot \boldsymbol{\gamma}, \quad (11)$$

donde $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \dots, \tau_6]$. Pasando el segundo miembro al lado izquierdo, esta ecuación se puede escribir de la siguiente manera

$$[\hat{\mathbf{w}}^\top, -\boldsymbol{\tau}^\top] \cdot \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{T}} \\ \boldsymbol{\gamma} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (12)$$

La Eq. (6) también se puede escribir de manera parecida

$$[\mathbf{A}, -\mathbf{B}] \cdot \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{T}} \\ \boldsymbol{\gamma} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (13)$$

y comparando estas dos últimas ecuaciones nos damos cuenta de que el vector $[\hat{\mathbf{w}}^\top, -\boldsymbol{\tau}^\top]$ debe ser, necesariamente, una combinación lineal de las filas de $[\mathbf{A}, -\mathbf{B}]$. En otras palabras, $\hat{\mathbf{w}}$ y $\boldsymbol{\tau}$ serán compatibles si y sólo si existe un vector $\boldsymbol{\beta} \in \mathbb{R}^6$ tal que

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{w}} \\ -\boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^\top \\ -\mathbf{B}^\top \end{bmatrix} \boldsymbol{\beta}, \quad (14)$$

o, equivalentemente, si y sólo si

$$\hat{\mathbf{w}} = \mathbf{A}^\top \boldsymbol{\beta}, \quad (15)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{B}^\top \boldsymbol{\beta}. \quad (16)$$

Dado que en nuestro caso $\det \mathbf{B} \neq 0$, podemos aislar el vector $\boldsymbol{\beta}$ de la Eq. (16) y substituirlo en la Eq. (15), llegando a

$$\hat{\mathbf{w}} = \mathbf{A}^\top \mathbf{B}^{-1} \boldsymbol{\tau}, \quad (17)$$

que proporciona la relación buscada para $\hat{\mathbf{w}}$.

Una vez hemos obtenido $\hat{\mathbf{w}}$, es fácil recuperar las coordenadas del punto R de contacto de la bola con la plataforma. Fijémonos que este punto se encuentra en la intersección de la recta de acción del torsor $\hat{\mathbf{w}}$ con el plano Π de la plataforma. Al ser $\hat{\mathbf{w}}$ un torsor de fuerza pura, sus componentes $[\mathbf{f}^\top, \mathbf{m}_O^\top]^\top$ dan directamente las coordenadas de Plücker de la recta soporte. Si suponemos que la ecuación de Π viene dada por $v_0 + \mathbf{v} \cdot \mathbf{x} = 0$, donde $\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3$ es un vector unitario normal al plano, y $v_0 \in \mathbb{R}$ es la distancia mínima de O a Π , el vector de posición de R viene dado por

$$\mathbf{r}_R = \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{m}_O - v_0 \cdot \mathbf{f}}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{f}}, \quad (18)$$

que es una expresión bien conocida en el ámbito de la geometría computacional de rectas [14, pág. 138]:

3. SISTEMA DE CONTROL

Una vez halladas las ecuaciones que nos permiten conocer la posición de la bola y la relación entre los incrementos de posición en la plataforma y los ángulos de los motores, el siguiente paso es proponer un sistema de control que nos permita estabilizar la bola en el baricentro de la plataforma móvil.

El sistema de control propuesto se esquematiza en la Fig. 3 y tiene dos partes bien diferenciadas: el sistema de sensado del error, que permite obtener el error de posición de la bola, y el sistema de corrección de la posición, que genera las señales de control necesarias para reducir este error. Veamos cada uno de estos dos sistemas.

3.1. SENSADO DEL ERROR

Para medir el error de posición de la bola, definimos un sistema de referencia $\mathcal{P} = \{O'X'Y'Z'\}$ anclado a la plataforma móvil, con origen O' en su baricentro, y ejes $O'X'$ y $O'Y'$ paralelos al plano Π (Fig. 2). Utilizando este sistema, nuestro problema de control se reduce a estabilizar la bola en el origen O' de \mathcal{P} . El error de posición, por tanto, vendrá dado por el vector de posición de R en \mathcal{P} , $\mathbf{r}_R^{\mathcal{P}}$. Es fácil ver que

$$\mathbf{r}_R^{\mathcal{P}} = \mathbf{R}^\top \cdot (\mathbf{r}_R - \mathbf{r}_{O'}), \quad (19)$$

donde $\mathbf{r}_{O'}$ es la posición absoluta de O' , y \mathbf{R} es la matriz de rotación que proporciona la orientación absoluta de \mathcal{P} .

Sean e_x y e_y las componentes X' y Y' de $\mathbf{r}_R^{\mathcal{P}}$. Aunque podríamos tomar la cantidad $\sqrt{e_x^2 + e_y^2}$

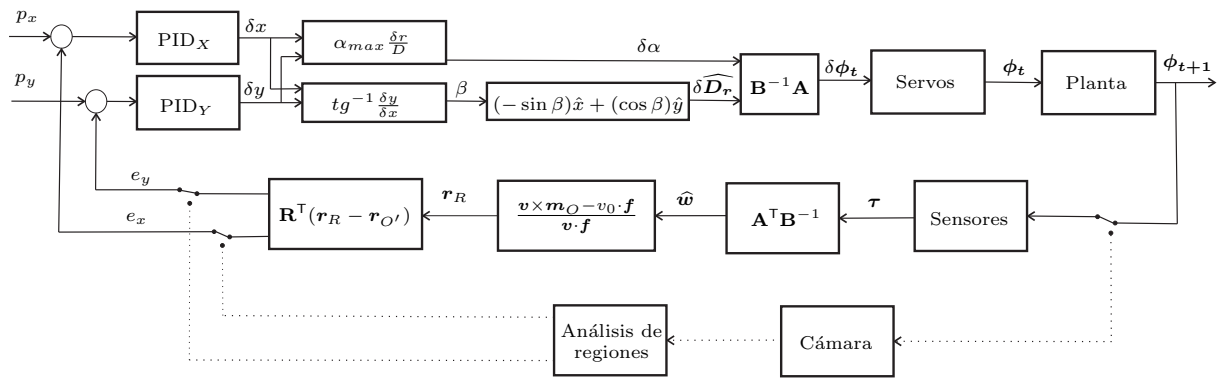


Figura 3: Sistema de control

como medida global del error, preferimos utilizar dos controladores PID independientes que reduzcan, respectivamente, los errores e_x y e_y . Es decir controlamos las dos coordenadas de la posición de la bola en el plano del mismo modo que se hace, por ejemplo, en [13].

La rama intermedia de la Fig. 3 esquematiza, de derecha a izquierda, el cálculo de e_x y e_y , que consta de los pasos siguientes:

1. Los sensores de los motores proporcionan los pares $\tau = [\tau_1, \dots, \tau_6]$.
2. A partir de τ , se utiliza la Eq. (17) para determinar el torsor $\hat{w} = (\mathbf{f}^T, \mathbf{m}_O^T)^T$ que la bola efectúa sobre la plataforma.
3. Se aplica la Eq. (18) para obtener el vector de posición absoluto de R , \mathbf{r}_R .
4. Finalmente, se utiliza la Eq. (19) para obtener \mathbf{r}_R^P y por tanto sus componentes e_x y e_y .

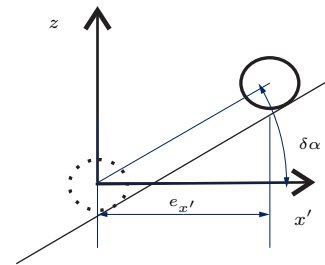
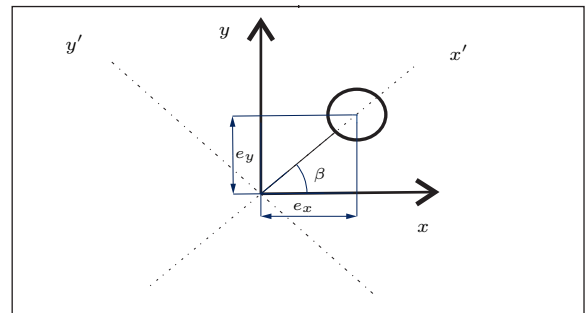


Figura 4: Eje y ángulo de rotación

3.2. CORRECCIÓN DE LA POSICIÓN

La rama superior de la Fig. 3 describe, de izquierda a derecha, el flujo de cálculos involucrados en la corrección del error. Los errores e_x y e_y se introducen en dos controladores PID de tiempo discreto, dando como resultado dos incrementos de posición δx y δy en ambos ejes. El controlador que corrige e_x implementa la siguiente ley de control

$$\delta x = k_p e_n + k_d(e_n - e_{n-1}) + k_i \sum_{i=-\infty}^{i=n} e_i, \quad (20)$$

donde e_n es el valor de e_x en el n -ésimo instante de tiempo, y k_p , k_i , y k_d son las constantes proporcional, integral, y derivativa, respectivamente. El controlador para e_y implementa una ley análoga.

A partir de estos incrementos, se asignará a la plataforma un eje y un ángulo de giro. El primer paso es obtener el eje de rotación.

$$\beta = \text{tg}^{-1} \frac{\delta y}{\delta x} \quad (21)$$

$$\mathbf{u} = (-\sin \beta) \hat{x} + (\cos \beta) \hat{y} \quad (22)$$

Donde \mathbf{u} es un vector director del eje de rotación. Es necesario también asignar un ángulo de rotación, que se hará en base a la norma del vector definido por los errores en ambos ejes. Para ello, se utilizará una función lineal con un valor de saturación que asigne un ángulo máximo para un valor de la norma mayor a una distancia D . Teniendo en cuenta que la norma del error viene dada por $\delta r = \sqrt{\delta x^2 + \delta y^2}$,

$$\delta \alpha = \begin{cases} \alpha_{max} \frac{\delta r}{D} & \delta r \leq D \\ \alpha_{max} & \delta r > D \end{cases} \quad (23)$$

Con la dirección del eje instantáneo de rotación y

el incremento de giro, ya es posible definir el torsor $\delta\hat{D}$. Teniendo en cuenta que a la plataforma se le infringe una rotación pura alrededor de su eje, $\delta\hat{D}_t$ será nulo en todo momento.

$$\delta\hat{D} = \delta\alpha \begin{bmatrix} \mathbf{OO}' \times \mathbf{u} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Siendo el vector \mathbf{OO}' la relación entre el sistema de referencia de la base fija con el sistema de referencia utilizado para medir el error. $\delta\hat{D}$ será la entrada a la matriz jacobiana descrita en la ecuación (7), dando como resultado el incremento de los ángulos en los seis servos necesario para corregir la posición.

4. IMPLEMENTACIÓN

Para implementar los actuadores del robot se han utilizado seis servomotores Dynamixel AX-12. Para los enlaces que conectan las articulaciones esféricas se han utilizado barras de nylon de 62 mm de diámetro. Estas barras sólo transmiten fuerzas a lo largo de sus ejes por estar ancladas por sus extremos a través de rótulas esféricas. Sin embargo, cuando se realizan pruebas de funcionamiento con robots paralelos, no es raro que por error se alcancen los límites articulares de sus juntas esféricas, transmitiendo pares de fuerza a través de las barras que puedan dañar el propio robot. La utilización de barras flexibles se ha revelado de gran utilidad ya que permiten que las rótulas esféricas alcancen sus límites articulares sin que por ello el robot sufra daños.

La base y la plataforma del robot, ambas de forma hexagonal, se han materializado mediante una impresora 3D. En la base, los servomotores están colocados sobre los vértices del hexágono, de manera paralela a cada uno de los lados mayores. Las articulaciones se unen a cada uno de los actuadores a través de unos brazos que, en la posición de referencia, apuntan hacia el centro de cada lado mayor de la base hexagonal. Estos brazos también se han materializado con una impresora 3D. Las juntas esféricas son elementos estándar de bajo coste.

Sobre la plataforma móvil se ha fijado una plancha rectangular de 160×120 mm sobre la que rodará una bola de 20 mm de radio y 30 gramos de peso.

Para probar el sistema, y poder aislar el origen de los posibles problemas que puedan aparecer, la posición de la bola se obtiene también con una cámara USB PSP Eye, con una resolución de 640×480 píxeles, colocada en posición cenital a 50 cm del plano sobre el que rueda la bola, tal como se muestra en la Fig. 5. Utilizando el paquete OpenCV,

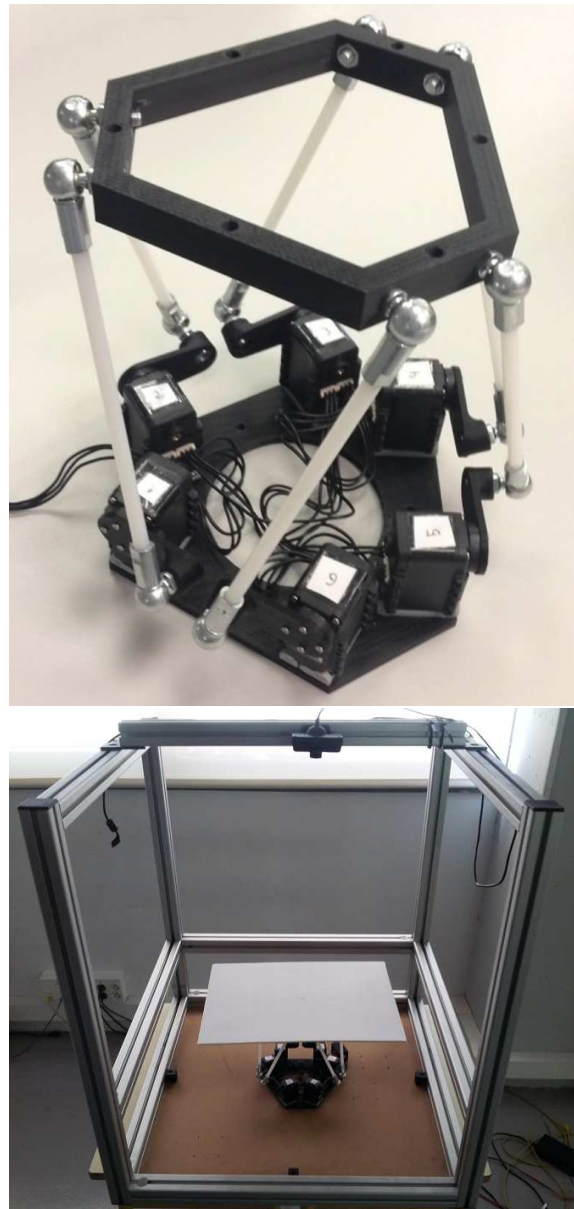


Figura 5: Robot paralelo construido, y su situación en el sistema experimental.

se obtiene la posición del centro de gravedad de la bola. Dado que esta posición se obtiene en coordenadas del plano de la imagen, es necesario una transformación que nos devuelva las coordenadas de la bola en el sistema de referencia del mundo utilizando la cinemática del robot descrita en la Sección 2.

Todo el software desarrollado para llevar a cabo este experimento ha sido escrito en lenguaje C++, debido principalmente a su eficiencia y portabilidad. Cabe también mencionar que, debido a que los servomotores Dynamixel AX-12 poseen su propio protocolo de comunicación, se ha tenido que crear una librería de comunicaciones.

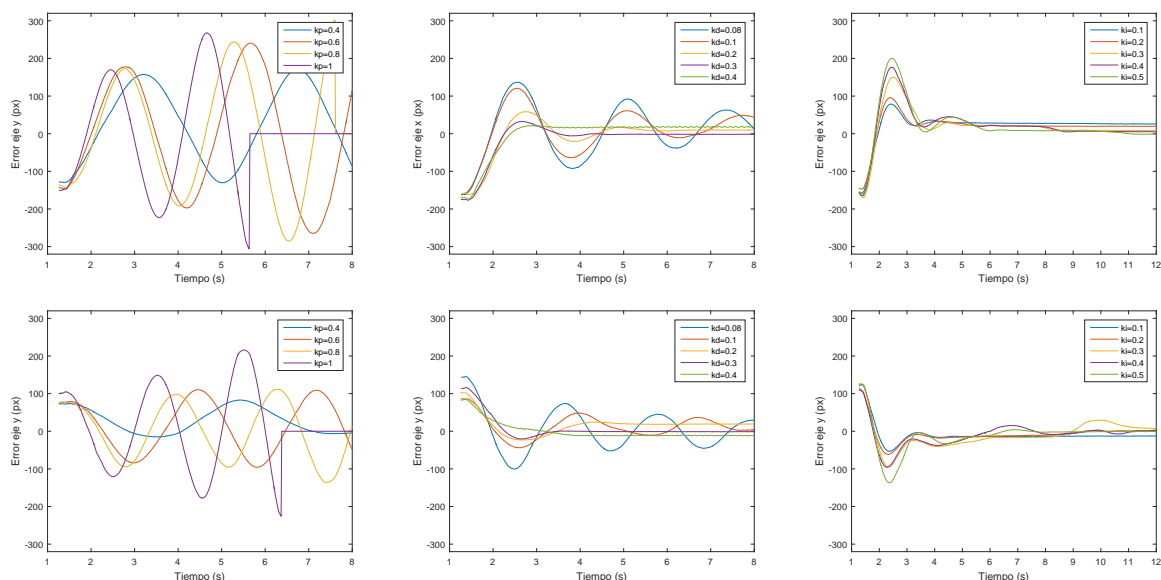


Figura 6: Influencia de k_p , k_d y k_i sobre la salida del sistema

En el momento en que fue redactado este trabajo, se encontraba operativo el bucle de control utilizando una cámara. Queda, por tanto, pendiente cerrar el bucle de control utilizando la información de fuerza y comparar los resultados obtenidos con los resultantes de utilizar el sistema de visión. A continuación, veremos, por tanto, cómo los parámetros del sistema de control influyen sobre las salidas del sistema utilizando únicamente el sistema de visión.

A medida que se aumenta el valor de k_p , llega un punto en que el sistema se hace inestable. Esta inestabilidad queda patente en la Fig. 6, donde para $k_p = 1$ y aproximadamente en $t = 5,6s$ la bola sale del campo de visión y la plataforma vuelve a la posición de reposo. A continuación, con la introducción de una ganancia diferencial, se tratará de corregir esta inestabilidad.

Eligiendo un valor de $k_p = 0,8$ e introduciendo una ganancia diferencial, se comprueba como el tiempo de estabilización se reduce, a medida que k_d aumenta. Sin embargo, a partir de cierto valor, pequeñas variaciones del error se traducen en picos en la salida del sistema, haciendo que la plataforma oscile con altas frecuencias alrededor de su punto de equilibrio. Un valor de $k_d = 0,3$ nos sitúa en un comportamiento adecuado.

Debido al rozamiento seco entre la bola y la superficie obtenemos un error en régimen permanente que no puede ser compensado con un mero ajuste de la constante k_i , debido a la naturaleza no lineal del fenómeno. Por consiguiente, en la implementación actual se ha fijado $k_i = 0$, ya que cualquier otro valor no aporta una mejora sustancial.

En una planta didáctica, una posible manera de limitar el error en régimen permanente sería elegir otros materiales que redujeran el rozamiento seco entre la plataforma y la bola, en cuyo caso tendría sentido buscar un valor óptimo de k_i .

5. CONCLUSIONES

En este artículo nos hemos centrado en el diseño, análisis e implementación de un robot paralelo 6-RSS para la estabilización de la posición de una bola sobre un plano. Aunque el sistema es de bajo coste, proporciona una gran versatilidad en la actuación, y resuelve a la vez el problema del sensado de posición de la bola siguiendo las ideas presentadas en [8].

Se ha mostrado cómo la utilización de la teoría de tóreses para formular el problema de la actuación y del sensado conduce a una formulación simple y unificada de ambos problemas.

La utilización del sistema propuesto tiene dos ventajas fundamentales. Por un lado, al disponer de una actuación que permite ejecutar tóreses de rotación instantánea arbitrarios, abre la posibilidad a la utilización de estrategias de control mucho más sofisticadas a las que se han venido utilizando hasta el momento. Por otro lado, el disponer de la posición de la bola de forma prácticamente directa, sin la necesidad de procesar importante volúmenes de información como sucede cuando se utilizan imágenes, se eliminan retardos que degradan el comportamiento de cualquier estrategia de control que no los tenga en cuenta.

Referencias

- [1] S. Awtar, C. Bernard, N. Boklund, A. Master, D. Ueda, and K. Craig. Mechatronic design of a ball-on-plate balancing system. *Mechatronics*, 12(2):217–228, 2002.
- [2] O. Bohigas, M. Manubens, and L. Ros. Singularities of non-redundant manipulators: A short account and a method for their computation in the planar case. *Mechanism and Machine Theory*, 68:1–17, 2013.
- [3] O. Bohigas, M. Manubens, and L. Ros. *Singularities of robot mechanisms: numerical computation and avoidance path planning*, volume 41 of *Mechanisms and Machine Science*. Springer, 2016.
- [4] O. Bohigas, D. Zlatanov, L. Ros, M. Manubens, and J. M. Porta. A general method for the numerical computation of manipulator singularity sets. *IEEE Transactions on Robotics*, 30(2):340–351, 2014.
- [5] J. K. Davidson and K. J. Hunt. *Robots and screw theory: applications of kinematics and statics to robotics*. Oxford University Press, 2004.
- [6] J. Duffy. *Statics and kinematics with applications to robotics*. Cambridge University Press, 1996.
- [7] X. Fan, N. Zhang, and S. Teng. Trajectory planning and tracking of ball and plate system using hierarchical fuzzy control scheme. *Fuzzy Sets and Systems*, 144(2):297–312, 2004.
- [8] R. Frigola, L. Ros, F. Roure, and F. Thomas. A wrench-sensitive touch pad based on a parallel structure. In *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3449–3454, May 2008.
- [9] C. Ham and M. Taufiq. Development of a ball and plate system. In *ASEE Annual Conference and Exposition Proceedings*. ASEE Conferences, 2015.
- [10] J. Hauser, S. Sastry, and P. Kokotovic. Non-linear control via approximate input-output linearization: the ball and beam example. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37(3):392–398, 1992.
- [11] A. Kassem, H. Haddad, and C. Albitar. Comparison between different methods of control of ball and plate system with 6-DOF Stewart platform. *IFAC-PapersOnLine*, 48(11):47–52, 2015.
- [12] H. Liu and Y. Liang. Trajectory tracking sliding mode control of ball and plate system. In *2010 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR 2010)*, volume 3, pages 142–145. IEEE, 2010.
- [13] M. Moarref, M. Saadat, and G. Vossoughi. Mechatronic design and position control of a novel ball and plate system. In *2008 16th Mediterranean Conference on Control and Automation*, pages 1071–1076, 2008.
- [14] H. Pottmann and J. Wallner. *Computational Line Geometry*. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [15] E. F. Sinaga, E. B. Manurung, V. A. Chee, and A. Djajadi. Building and controlling a ball and plate system. In V. V. Das, J. Stephen, and Y. Chaba, editors, *Computer Networks and Information Technologies: 2nd International Conference on Advances in Communication, Network, and Computing (CNC 2011)*, pages 600–608. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [16] Y. Wang, M. Sun, Z. Wang, Z. Liu, and Z. Chen. A novel disturbance-observer based friction compensation scheme for ball and plate system. *ISA Transactions*, 53(2):671–678, 2014.

TELEOPERACIÓN DE INSTRUMENTOS QUIRÚRGICOS ARTICULADOS

A. M. Gómez Delgado, C.J. Pérez del Pulgar Mancebo, A. Reina Terol, V.F. Muñoz
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Málaga, Andalucía Tech
carlosperez@uma.es

Resumen

En los últimos años se han llevado a cabo grandes avances en el ámbito de la robótica médica que han dado lugar al estudio y desarrollo de diversos robots quirúrgicos. En particular, la cirugía mínimamente invasiva ha evolucionado hacia lo que se denomina cirugía de un único puerto. Este tipo de cirugía permite introducir todos los instrumentos a través de un único punto de inserción. En este sentido, en este trabajo se describe la plataforma CISOBOT, desarrollada por la Universidad de Málaga para este tipo de intervenciones, así como su ampliación a través del diseño mecatrónico de un instrumento motorizado que permite mover la punta de éste. El objetivo de esta plataforma es el estudio de nuevos algoritmos de control que permitan la teleoperación bilateral y el empleo de guiado háptico.

Palabras clave: Teleoperación, robótica médica, instrumento motorizado, dispositivo háptico

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se han realizado grandes avances relacionados con las técnicas quirúrgicas basadas en cirugía mínimamente invasiva (MIS). El estudio y desarrollo de técnicas SILS (cirugías de un solo puerto por sus siglas en inglés) han permitido introducir varios instrumentos articulados a través de un mismo punto de inserción (fulcro). Algunos ejemplos son: cirugía por una sola incisión (SPAS), laparoscopia por una sola incisión (LESS) o cirugía endoscópica transluminal a través de orificios naturales (NOTES) [3].

Este tipo de procedimientos aportan ventajas al paciente como: disminución del malestar, riesgo de hemorragias y complicaciones, debido al menor trauma causado por el menor número de incisiones. Además, el tiempo de recuperación se ve también disminuido por este mismo motivo [5].

Sin embargo, estos beneficios derivan en nuevos inconvenientes para el cirujano. Se debe tener en cuenta el posible choque entre instrumentos tanto fuera como dentro del abdomen del paciente de-

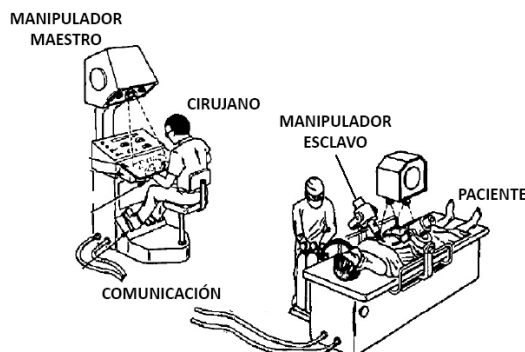


Figura 1: Ejemplo de sistema de teleoperación en cirugía.

bido a la introducción de varios instrumentos a través del mismo trocar. Además, la cámara laparoscópica también se introduce por la misma incisión, provocando una pérdida de triangulación y una reducción del campo de visión dentro del abdomen debido a su proximidad a los instrumentos [8].

El empleo de plataformas robóticas de teleoperación se emplean en cirugía para mejorar las habilidades del cirujano en intervenciones quirúrgicas [10]. Estas plataformas se basan en una arquitectura maestro esclavo tal y como que muestra en la Figura 1. El cirujano envía las órdenes mediante una consola (maestro) dotada normalmente de una pantalla y dispositivos hápticos. Estas órdenes son recibidas por uno o varios manipuladores que son los encargados de reproducir los movimientos del cirujano.

El empleo de estas plataformas aparece como una solución que podría paliar las desventajas explicadas anteriormente, se podría disponer de un sistema capaz de detectar y esquivar la colisión de instrumentos, control del movimiento de los instrumentos con el fin de facilitar la ejecución de estos, etc. En este sentido, la Universidad de Málaga se encuentra desarrollando la plataforma experimental de teleoperación CISOBOT [2] [7]. Este artículo contribuye al desarrollo de esta plataforma con el diseño mecatrónico de un instru-

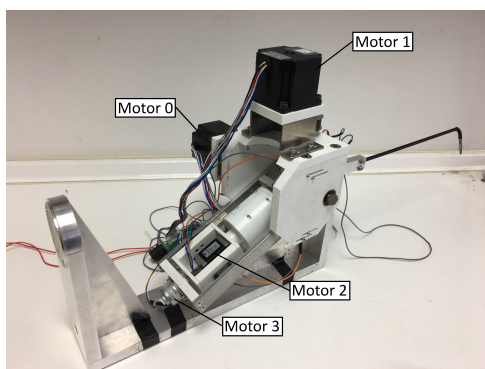


Figura 2: Instrumento motorizado con punta articulada.

mento motorizado que permite mover la punta y el control del mismo mediante una consola de teleoperación que emplea dispositivos hápticos.

2 INSTRUMENTO MOTORIZADO

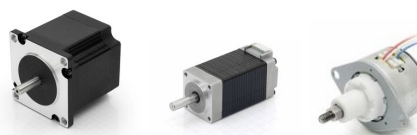
El prototipo del instrumento motorizado con punta articulada utilizado es el representado en la Figura 2. Este instrumento ha sido diseñado y fabricado en colaboración con la empresa PROSAIN S.L. El objetivo de esta herramienta es añadir tres grados de libertad en la punta de un instrumento quirúrgico empleado para técnicas SILS.

Dicho instrumento consta de una pinza en el extremo, cuatro motores paso a paso y cuatro finales de carrera. De estos, tres motores van conectados a una controladora Trinamic TMC2130, y el motor encargado de la apertura y cierre de la pinza va conectado a la controladora de Nanotec SMC42. A continuación, se explica con detalle dichos componentes.

2.1 MOTORES PASO A PASO

Los motores paso a paso se encargan de transmitir el movimiento a la punta articulada a través de cables tensores distribuidos a lo largo de la varilla. Esto proporciona al instrumento tres grados de libertad del tipo *Roll-Pitch-Yaw*. Este tipo de motores avanzan girando a pasos fijos de $1,8^\circ$, sin embargo, al estar conectado a un sistema de poleas, el ángulo por paso queda en $0,9^\circ$.

Siguiendo la numeración expuesta en la figura 2, el Motor 0 realiza el movimiento vertical de la punta, coincidiendo con la rotación denominada *Pitch*, el Motor 1 realiza el movimiento horizontal, que se corresponde con la rotación *Yaw*, y por último, el Motor 2 se encarga del movimiento de la varilla del instrumento sobre su propio eje, coincidiendo con la rotación denominada *Roll*. De este modo, se da



(a) Motor 0 y 1 (b) Motor 2 (c) Motor 3

Figura 3: Motores paso a paso empleados en el instrumento motorizado.

capacidad a la punta de moverse en las tres direcciones espaciales. Los tres motores, del fabricante Nanotec, son los mostrados en la figura 3a y 3b, y sus características más relevantes se describen en las tablas 1 y 2.

Tabla 1: Características de los motores 0 y 1

Especificación	Motor 0 y 1
Modelo	ST5918S2008-A
Voltaje	3.0 V
Corriente/Fase	2.0 A
Par de mantenimiento	88 Ncm
Peso	0.65 Kg

Tabla 2: Características del Motor 2

Especificación	Motor 2
Modelo	ST2018M0804-A
Voltaje	4.32 V
Corriente/Fase	0.8 A
Par de mantenimiento	3.00 Ncm
Peso	0.08 Kg

La función de abrir y cerrar la pinza que se encuentra en el extremo del instrumento la lleva a cabo el cuarto motor (Figura 3c), denominado Motor 3 en la figura 2. El movimiento rotativo se convierte en un movimiento lineal por la tuerca de rosca integrada en el motor lineal paso a paso, comportándose como un actuador lineal. En la tabla 3 se encuentran resumidas las principales características de dicho motor.

2.2 CONTROLADORAS

El esquema de conexiones realizado en la interfaz entre las controladoras y el instrumento motorizado se muestra en la figura 4. Para mayor claridad, se ha seguido el mismo código de colores de las conexiones en las placas reales.

La controladora TMC2130 (Figura 5a) se encarga de realizar el control en tiempo real de los motores paso a paso del instrumento. Este modelo es capaz de controlar precisamente tres motores. Según la información del fabricante, para la ali-

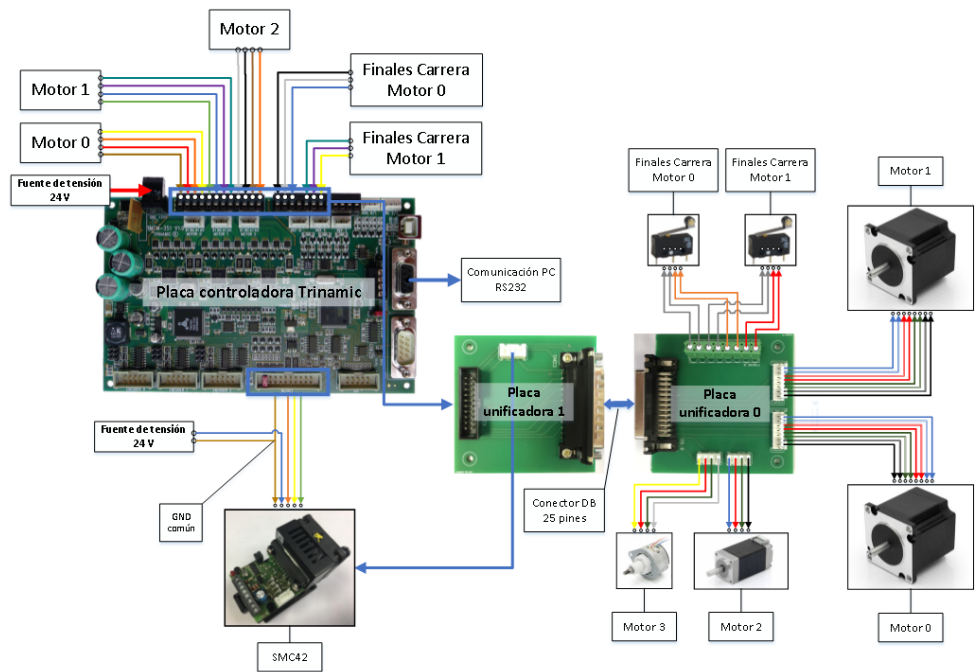


Figura 4: Esquema de conexionado entre las controladoras y los motores.

Tabla 3: Características del Motor 3

Especificación	Motor 3
Modelo	LPV2515S0104-Tr3.5X1
Voltaje	5.0 V
Corriente/fase	0.1 A
Carrera	12 mm
Peso	0.04 Kg

ejecuta mediante un flanco negativo en la entrada *Clock*. La señal *Direction* especifica la dirección de rotación del motor. Por último, la señal *Enable* desconecta la corriente de fase después de recibir un flanco de subida y el motor no recibirá corriente. La señal de un flanco de bajada suministra el motor con corriente de nuevo. De esta forma, la señal *Enable* debe estar a nivel bajo para realizar un movimiento del motor.

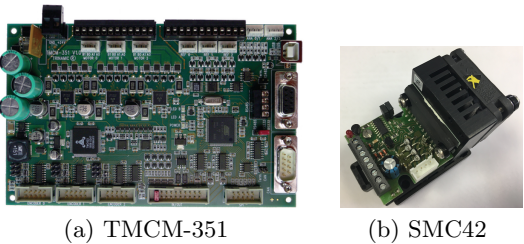


Figura 5: Controladoras empleadas.

Cada motor transmite el movimiento a la punta a través de unos cables tensores en el interior de la varilla, lo cuál provoca que la relación entre el movimiento del motor y la posición de la punta no sea una relación lineal. Por este motivo, se ha desarrollado un programa encargado de calibrar la relación motor-instrumento.

mentación será necesaria una tensión continua de 24V, y una corriente máxima de 2,8A por cada motor. Finalmente, la placa se comunica con el PC a través de una conexión serie RS-232.

La inicialización de los motores se realiza mediante el empleo de los cuatro finales de carrera instalados en el instrumento. Con ellos se obtienen las referencias del Motor 0 y el Motor 1 y se inicializa de manera que la punta quede recta. Además, se configuran las variables *Clock*, *Direction* y *Enable*, necesarias para la controladora SMC42. La señal *Clock* se configura inicialmente con un pulso de 10ms. La señal *Direction* se configura en un inicio a nivel bajo, correspondiente al cierre de la pinza, y siendo nivel alto cuando se precise su apertura. Por último, la señal *Enable* se inicializa a nivel alto.

El control del Motor 3 se lleva a cabo por medio de la controladora SMC42 de la empresa Nanotec, mostrada en la figura 5b. Sus características principales son: voltaje de funcionamiento entre 21V y 37V a corriente continua y una capacidad de corriente máxima de 2A por fase. Se encuentra conectada a la placa controladora TMCM-351, empleando las señales *Direction*, *Enable* y *Clock* para controlar el movimiento del motor 3. Cada paso se

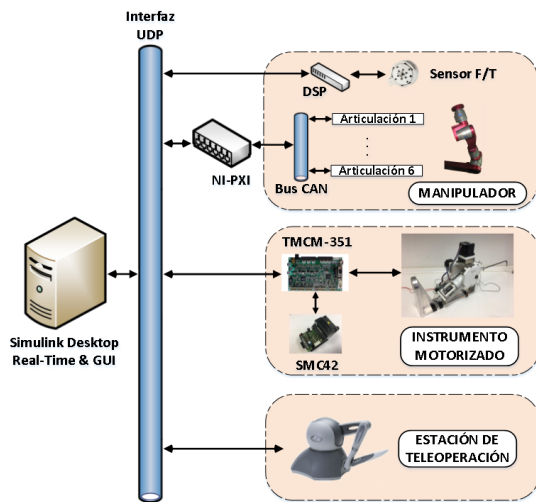


Figura 6: Arquitectura de la plataforma CISOBOT.

3 ENTORNO DE TELEOPERACIÓN

la figura 6 muestra la arquitectura del sistema de teleoperación que se ha empleado en la plataforma CISOBOT. Esta arquitectura consta de un PC que emplea el software *Simulink Desktop Realtime* para ejecutar el programa de control. Este PC se comunica con tres sistemas: manipulador, instrumento motorizado y estación de teleoperación. Primero, el sistema del manipulador compuesto por un sensor de esfuerzos y un brazo robótico. El segundo, es el instrumento motorizado que incluye la propia herramienta y las dos controladoras encargadas de su movimiento. Por último, el sistema de la estación de teleoperación está compuesto por un dispositivo háptico. Todas las comunicaciones entre los diferentes sistemas se realizan a través de un interfaz UDP.

La figura 7 se presenta la plataforma de teleoperación CISOBOT con la integración del instrumento motorizado.

3.1 MANIPULADOR

El robot esclavo de este sistema teleoperado se trata de un brazo robótico modular de seis grados de libertad, diseñado por la empresa Robotnik Automation mostrado en la figura 7. Este robot está basado en módulos rotativos PowerCube de la marca Schunk que funcionan como controladores distribuidos.

El envío y lectura de las medidas del manipulador se llevan a cabo a través de un programa desarrollado en LabVIEW e implantado en un ordenador embebido de tiempo real NI-PXI. Este programa se encarga de la inicialización de los manip-



Figura 7: Plataforma CISOBOT dotada del instrumento motorizado.

uladores, y del envío de las referencias de velocidad o posición a las controladoras de cada articulación del manipulador. De igual forma recibe las posiciones y velocidades de cada articulación.

En la zona de interfaz entre el efector final del manipulador Robotnik y el instrumento motorizado se encuentra un sensor de esfuerzos fabricado por la empresa ATI Industrial Automation, en particular el modelo *Network Force/Torque Sensor System* o *Net F/T*. El dispositivo de control del sensor (DSP) proporciona un interfaz UDP, que ha permitido que este sensor se conecte directamente con la aplicación que se ejecuta en el PC.

3.2 DISPOSITIVO HÁPTICO

La estación de teleoperación está basada en una pantalla que muestra la imagen del interior del abdomen, así como dos dispositivos hápticos Phantom Omni. Estos dispositivos ofrecen hasta seis grados de libertad y proporcionan retroalimentación de fuerzas de hasta 3.3 N. La tabla 4 resume las características principales del dispositivo háptico empleado.

Tabla 4: Características del dispositivo háptico

Especificación	Descripción
Espacio de trabajo	160 x 120 x 70 mm
Área de la base	168 x 203 mm
Rigidez	1.26 N/mm Eje X
	2.31 N/mm Eje Y
	1.02 N/mm Eje Z

El dispositivo háptico proporciona dos parámetros

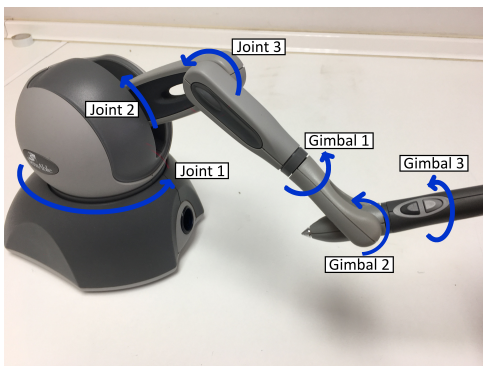


Figura 8: Aritculaciones del dispositivo háptico Phantom Omni.

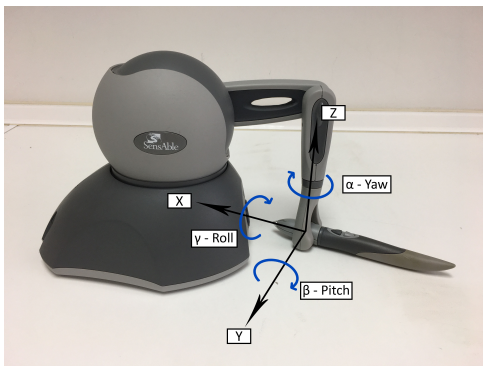


Figura 9: Representación de la orientación del lápiz del dispositivo háptico.

denominados *Joints* y *Gimbals* para conocer la posición y orientación del lápiz que permite realizar los movimientos. Como se puede ver en la figura 8, los tres primeros grados de libertad vienen dados por los denominados *Joints*, mientras que los tres siguientes son los denominados *Gimbals*. Estos últimos serán los utilizados para el cálculo de la orientación. La orientación del dispositivo háptico que se obtiene de dicho parámetro se corresponden con *Roll*, *Pitch*, *Yaw* como se muestra en la Figura 9.

Por otra parte, este dispositivo también consta de dos botones en el lápiz. El primer botón se emplea para activar los movimientos, es decir, el ma-

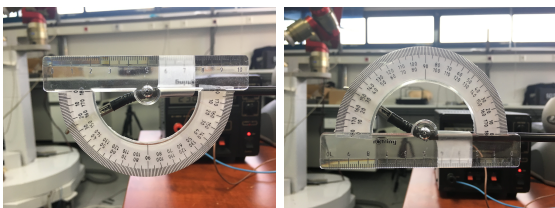


Figura 10: Ejemplo de medida de la posición angular en la punta de instrumento.

nipulador y el instrumento se moverán mientras se mantenga pulsado el primer botón. El segundo botón se emplea para accionar el motor encargado de abrir y cerrar la pinza.

Con respecto a la comunicaciones, este dispositivo consta de interfaz IEEE-1394 FireWire con la que se conecta directamente al PC. Debido a las limitaciones al emplear el entorno Simulink, las comunicaciones entre el sistema de control en Simulink y la estación de teleoperación se llevan a cabo a través de una aplicación desarrollada que hace de pasarela entre el dispositivo háptico y el PC. Estas aplicación se basa en la librería OpenHaptic, ofrecida por el fabricante.

4 EXPERIMENTOS

En esta sección se detalla el experimento realizado sobre el prototipo del instrumento motorizado, el cuál tiene como objetivo representar la relación motor-instrumento como se ha explicado anteriormente.

Para realizar este experimento se envían consignas de ángulos al motor. Empleando un transportador de ángulos en la punta (Figura 10) se comprueba posición angular de la punta del instrumento. Este procedimiento se ha repetido cada 5° en un rango de ángulos entre -45° y 45°.

Las figuras 11 y 12 muestran los resultados obtenidos. Como se puede apreciar, el comportamiento de la punta de instrumento es bastante lineal en los extremos, sin embargo, se puede apreciar una pequeña zona muerta cuando el instrumento se mueve alrededor de los 0°.

5 CONCLUSIONES

Este artículo ha presentado los nuevos desarrollos llevados a cabo en la plataforma experimental CISOBOT. En concreto, se ha ampliado esta plataforma añadiéndole un instrumento motorizado capaz de mover su punta mediante teleoperación. Los resultados muestran que la relación de movimientos de los motores del instrumento no se corresponden directamente con el movimiento que se realiza en la punta. Por este motivo se ha realizado un experimento en el que se ha obtenido esta relación para cada uno de los motores empleados. Por último, el instrumento ha quedado integrado en la plataforma CISOBOT. El siguiente paso es el desarrollo de algoritmos que permitan la realimentación de fuerzas, así como proporcionar guiado háptico al operador. **Agradecimientos**

A la Universidad de Málaga por el apoyo financiero del proyecto.

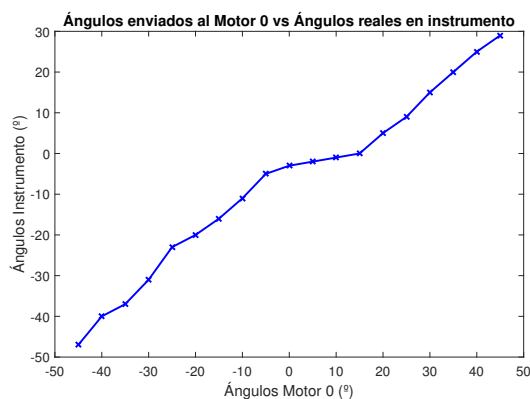


Figura 11: Relación entre la posición angular vertical del motor paso a paso (Motor 0) y la punta del instrumento.

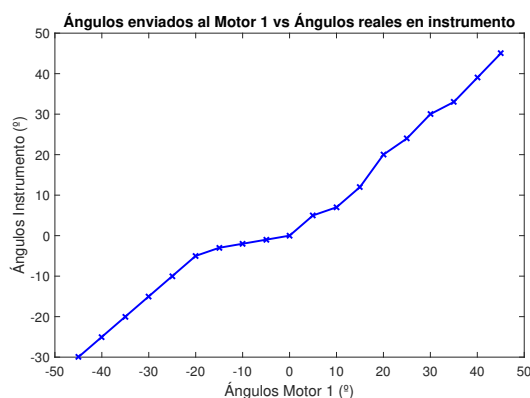


Figura 12: Relación entre la posición angular horizontal del motor paso a paso (Motor 1) y la punta del instrumento.

Referencias

- [1] Alzugaray López, Ignacio, Teleoperación de manipuladores robóticos, (2014) Universidad de Málaga.
- [2] Bauzano, E., Estebanez, B., Garcia-Morales, I., Muñoz, V. F., (2011) Robot quirúrgico auto-guiado para cirugía mínimamente invasiva en solitario. In Proc. Conf. Robot-Workshop, pp. 1-18.
- [3] Beasley, R. A, (2012) Medical robots: current systems and research directions, Journal of Robotics.
- [4] Casals, A., Frigola, M., Amat, J., (2009) La Robótica, una valiosa herramienta en Cirugía, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, vol. 6, pp. 5-19.
- [5] Chaparro Velasco, M. C. C., Vivas Albán, Ó A., (2016) Robótica quirúrgica, desde los grandes asistentes hasta la nanotecnología, Scientia et technica, vol. 21, pp. 182-190.
- [6] Correa A. C., (2016) Sistemas robóticos teleoperados, Ciencia e Ingeniería Neogranadina, vol.17 pp. 62-72.
- [7] del Pulgar, C. P., Garcia-Morales, I., Blanco, I. R., Muñoz, V. F., (2016) Navigation Method for Teleoperated Single-Port Access Surgery With Soft Tissue Interaction Detection, IEEE Systems Journal.
- [8] del Pulgar, C. P., Garcia-Morales, López Casado M.C., Muñoz, V. F., (2017) Navegación del instrumental en Robótica Quirúrgica, Jornadas Nacionales de Robótica, Spanish Robotics Conference.
- [9] Gomes, P., (2011) Surgical robotics: Reviewing the past, analysing the present, imagining the future, Robotics and Computer-Integrated Manufacturin, Elsevier.
- [10] Hoeckelmann, M., Rudas, I. J, Fiorini, P., Kirchner, F., Haidegger, T., (2015) "Current capabilities and development potential in surgical robotic, International Journal of Advanced Robotic Systems, SAGE Publications Sage UK: London, England.
- [11] Okamura, A. M, Mataric, M. J, Christensen, H. I, (2010) Surgical robotics: Medical and health-care robotics, IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 17, pp. 23-37.
- [12] Okamura, A. M, (2004) Methods for haptic feedback in teleoperated robot-assisted surgery, Industrial Robot: An International Journal, vol.31 pp. 499-508.
- [13] Sanchez-Tapia, E. J., (2012) Implementación de un sistema teleoperado con reflexión de fuerza de seis grados de libertad.

CONTROL OF A ROBOTIC ARM FOR TRANSPORTING OBJECTS BASED ON NEURO-FUZZY LEARNING VISUAL INFORMATION

J. Hernández Vicén, Juan Miguel García, Santiago Martínez, C. Balaguer

Abstract

New applications related to robotic manipulation or transportation tasks, with or without physical grasping are being developed. To perform these activities different kind of perceptions are need. One of the key perceptions in robotics is vision. However, camera-based systems have inherent errors which affect the quality of the information obtained. Image distortion slows down information processing and defers data availability to last processing stages, decreasing performance. In this paper, a new approach to correct diverse sources of visual distortions on images in early stages of the data processing is proposed.

The goal of the proposed system/algorithm is the computation of the tilt angle of an object transported by a robot. After capturing the image, the computing system extracts the angle using a Fuzzy filter that corrects all distortions at only one processing step. This filter has been developed by means of Neuro-Fuzzy learning techniques, using data obtained from real experiments. In this way, computing time can be decreased and the performance of the robotic application can be increased. The resulting algorithm has been tried out experimentally in robot transportation tasks in the humanoid robot TEO (Task Environment Operator).

Key words: Humanoid, Robots, Non-grasping, manipulation, ANFIS, NeuroFuzzy, Filter.

1 INTRODUCTION

Advances in technology are encouraging the development of new applications and new tasks to be accomplished by humanoid robots. Manipulation tasks can be classified in two main groups: Grasping tasks, in which the way to grab an object by the hand of a humanoid robot is studied [1] and Non-Grasping tasks. In this second type of manipulation tasks, the manipulated object is not fixed to the robot through a solid union. That is, the object can be moved by another [2] or can be on an object that the robot is grasping (For example, a bottle on a tray shown in Fig. 1).

Consequently, it is not possible to ensure a proper transportation task. Therefore, the object features must be accurately obtained in order to be capable of reaching a stability control in the future.

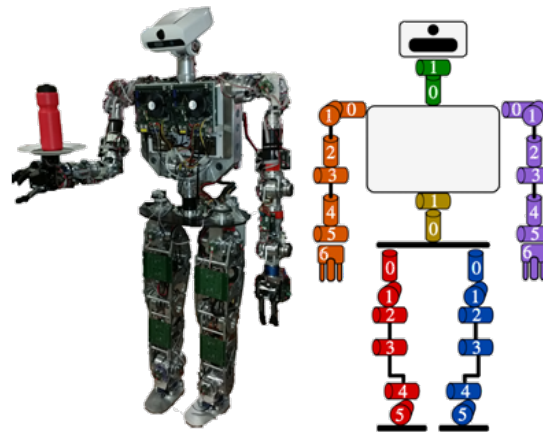


Figure 1: Humanoid Robot Teo Waiter

To obtain those object features, computer vision techniques have been applied. From a camera, the visual information has been transformed into the data needed to control the object. Unfortunately, this visual information is distorted by the inherent error of the camera and by the external errors introduced in the pictures. The method developed has been applied on the example described previously (The bottle on a tray). The information of the bottle obtained by artificial vision has these inherited errors which are produced by the camera and by the perspective between the desired object and the camera. These errors must be corrected to achieve an upcoming control to keep the stability of the transported bottle implemented in the robot, TEO [3].

Therefore, this investigation presents a new method to eliminate the distortion errors related to computer vision. This method lets us to obtain real movement values in an on-line way and without having to rectify the captured images. So, the computation time can be decreased and the performance of the robotic application can be increased.

The paper is organized as follows: The following section presents how it is obtained the different features of the bottle through the computer vision methods. Section three presents the problems related to the use of computer vision and the new approach proposed to solve it. At the same time, it is shown the ANFIS tool applied to develop the proposed NeuroFuzzy filter. In the fourth section, the experiments and results which demonstrate the correction of the error in the system proposed in this research are shown. Finally, some conclusion and prospects for the future are proposed.

2 VISION FEATURES ACQUISITION

To accomplish the bottle balance by manipulation techniques following the LIPM, a wide range of features have to be obtained (COG, inclination angle, speed, acceleration). These characteristics to close the control loop have been acquired mainly by computer vision.



Figure 2: Steps followed to acquire the bottle characteristics and close the loop.

To control the bottle equilibrium, first it is needed to localize it in the space of the image, knowing the situation in which it is in each moment. The inclination angle will be also obtained, to detect if it is in an equilibrium position or otherwise if the humanoid robot must make a correction in the tray to avoid the bottle falling.

Once the tilt angle has been acquired, the angular speed and the angular acceleration will be calculated. These properties will be the inputs to control, in a future work, the robot arm position, closing the feedback loop in order to achieve the bottle balance.

To localize the bottle, the image is discretized separating in the 3 RGB channels, subtracting red and blue channels, and applying a threshold and a filter. After having differenced the bottle from the other objects in the image, the geometrical center has been chosen based on a good reason: As it is geometrically symmetric, its center of mass is the same as its geometrical center.

It is important taking into account that by computer vision we are not able to know the content inside the bottle, so we consider it is filled up with water having constant density. Therefore, we have an advantage in knowing each time the position in the image corresponding with both, the COM and the geometrical center of the bottle.



Figure 3: Centre Of Geometry (COG) obtained by computer vision.

3 NEUROFUZZY LEARNING

Starting from controlling the balance of the bottle, part of this research has focused on obtaining the angle of the bottle. Through OpenCV tools, the images have been filtered to distinguish the bottle from the rest of the image. And once detected, a box has been attached. The color of the box depends on the inclination value. In other words, the angle of the bottle. Green, if it is stable; orange, if it is losing stability; and finally red, if it is already unstable.

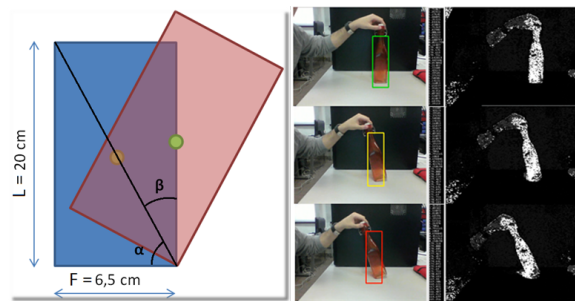


Figure 4: Tilt angle detected by computer vision techniques

However, this visual information is distorted by the inherent error of the camera and by the external errors introduced in the pictures. Errors produced by the camera defects, which are directly related to the camera lenses and another ones caused by the perspective in which the object is being seen.

As the defects introduced by the camera in our system are so low, they have been disregarded. However, high errors are brought in by the perspective in which the bottle is being seen by the camera at each moment. In Fig.5 two images can be seen. In both of them the tray and the bottle are maintained in the same pose.

The only variation has been made in the orientation of TEO's head. As it can be seen in Fig.5, the image changes completely. In the image (a), it is found the bottle fully straight, and in the other image (b), it is shown the bottle with an inclination. If the real tilt angle is aimed to be obtained directly from these images without using any filter, the data acquired in the first one would be similar to the real angle, whereas the second one would be interpreted wrongly, obtaining an erroneous inclination angle.

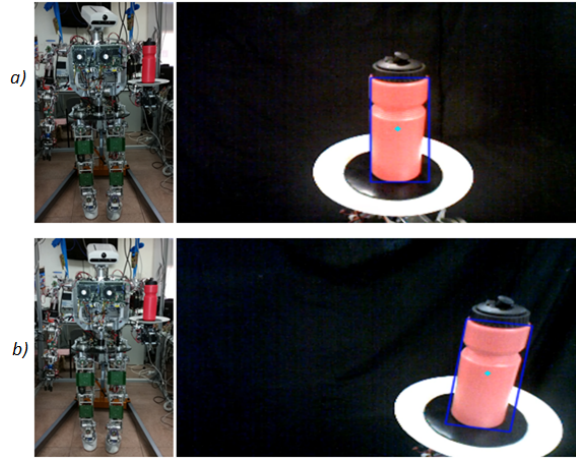


Figure 5: Image showing the perspective error depending of the position of the bottle

A wide range of procedures are available to correct the perspective error [4], also by comparing images taken with different lenses [5] and without calibrating the camera [6]. However, this techniques used to modify the perspective distortion are just based on the correction of the object in the image, in such a way that not mattering the real inclination or orientation, it finally appears as straight as it is explained in Fig. 6 “Classical approaches”. These corrections imply an important computational cost. [7].

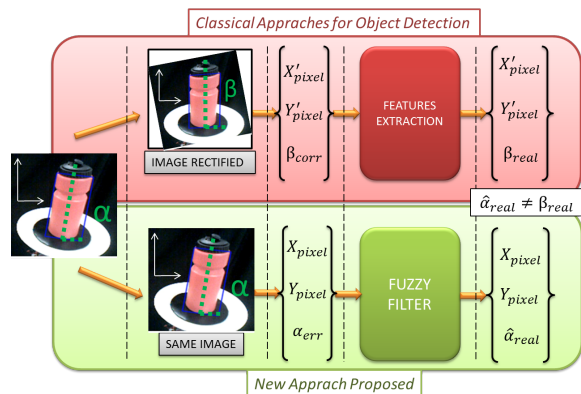


Figure 6: Comparison between classical approaches and the proposed approach in this paper.

Therefore, instead of making a correction on the image and a trigonometric calculus, which takes too much time, an alternative to these classical methods is proposed in this paper, avoiding the complex image manipulation steps needed in the other procedures.

To obtain the correct value of the angle, it is applied a filter based on NeuroFuzzy Learning. the tool used to teach to the filter is called ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System). This tool is a multilayer feedforward network in which each node performs a particular function on incoming signals as well as a set of parameters belonging to this node. The formulas for the node functions may vary from node to node, and the choice of each node function depends on the overall input-output function which the adaptive network is required to perform [11][12].

To train the ANFIS system both a training and checking dataset with the information needed have been recorded. In the first one, the performance of the error among the image space introduced in the inclination angle has been recovered by several samplings. These samples have been obtained by positioning the bottle in different controlled positions and inclinations. This information, is used to build the surface to model this error, in order to correct it later. Whereas in the second dataset, information which has been chosen from different positions of the space of the image has been added to have knowledge of all the vision field. This dataset, in which the real inclination angles are well known, are being used to prove that the surface obtained by the ANFIS is reliable.

To validate the information previously acquired by computer vision, the bottle was placed in known and defined positions of the image with known inclination angles. The real data was compared with the calculated data and both were similar. Having reliable information, a training dataset and a checking dataset have been created. Those datasets are needed for the NeuroFuzzy learning based system.

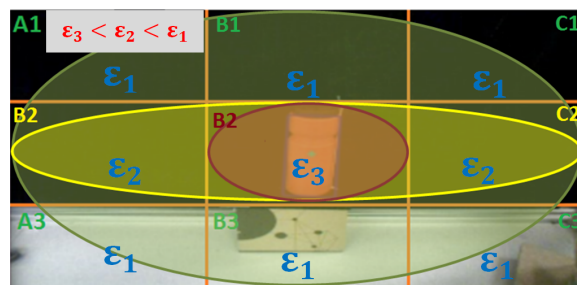


Figure 7: Selection of the Error Priority in the different quadrants of the Image.

The first one provides the information of the bottle corresponding to the different quadrants of the image, whereas the checking dataset provides the NeuroFuzzy reliable information about the system behavior. As the future goal of this research is to achieve a robust human inspired control [10] of the equilibrium of a bottle on a tray, the image has been divided in nine different zones, according to the accuracy in the correction required for each one of them. This zones are shown in Fig. 7.

The quadrant division has been defined considering the main positions that the bottle occupies in the image. As the head of the robot has been programmed in such a way that it moves trying to keep the bottle centred in the divisions A2, B2 and C2 seen in Fig. 7, the bottle is positioned most of the time in the three horizontal central quadrants. As those quadrants are occupied by the bottle most of the time, the accuracy in the error correction is higher inside them. As the central quadrant has the highest rate of cases in which the bottle is positioned, the error there must be the lowest in the image.

All this information has been introduced in the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), available in Matlab. With the ANFIS, the NeuroFuzzy Filter was obtained. The filter is used to make the corrections in the inclination angle of the bottle perceived by the camera. With this correction, the real tilt angle information needed to make the proper rectification of the tray position is finally achieved.

4 EXPERIMENTS

In order to prove that the information modified by the NeuroFuzzy filter applied is reliable an experiment has been developed. The bottle has been placed over the tray and the robot has moved the arm in such a way that the bottle stays in the four different quadrants in which the image has been divided.

This experiment has been done positioning the bottle in different angle inclinations. The goal of this experiment is trying if the Fuzzy filter is capable of rectify properly the data obtained by the image, no mattering the inclination angle of the bottle.

As it can be seen in Fig.8 the robot arm has been commanded in the space of the image. All the movements of the bottle have been recorded by the robot camera. From these movements, the information related to the position in the pixel X and the pixel Y, as well as the inclination angle acquired by the camera, were obtained and recorded in a table.

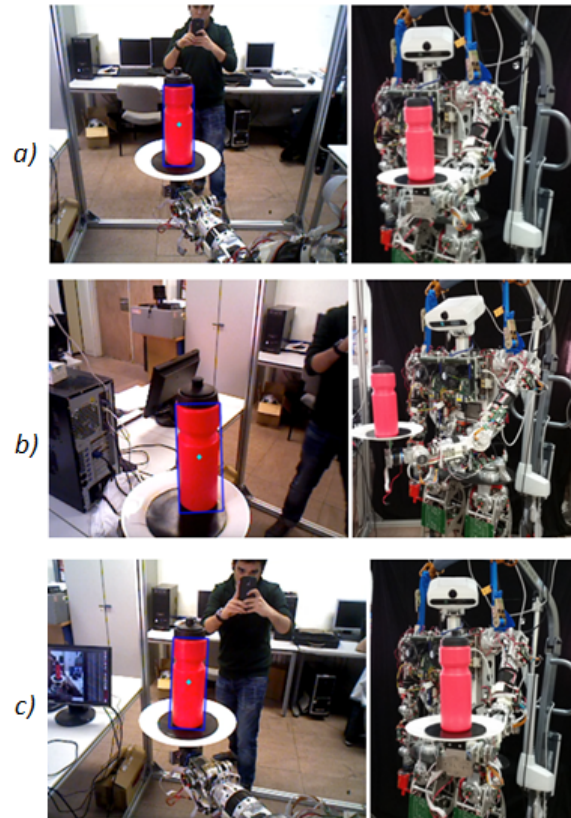


Figure 8: Experiment 01: Positioning the bottle in different inclination angles and positions.

It is important to notice that this tilt angle is not the real one, as far as the image nature is being altered by the errors introduced by the camera and the perspective.

PIXEL X	PIXEL Y	REAL ANGLE	ANGLE DETECTED	FUZZY CORRECTION	FINAL ANGLE	ERROR %
270	157	81	68,159	-14,9659	83,1249	2,62
26	62	81	93,0146	-12,0505	105,0651	29,71
294	149	99	83,405	-53,2652	136,6702	38,05
44	66	99	170,354	-36,9611	144,3151	45,77
282	153	87	74,0545	-14,9475	89,002	2,30
43	69	87	98,7461	12,892	85,8541	1,32
286	148	93	76,7594	-22,6733	99,4327	6,92
35	62	93	103,3924	9,8508	93,5416	0,58
131	67	85	91,1691	5,3272	85,8419	0,99

Figure 9: Data obtained after applying the NeuroFuzzy filter.

In Fig.9, the inclination angles obtained in the different positions are shown. After applying the NeuroFuzzy filter, this information is corrected and the final angle calculated is presented in the table with the error percentage.

A second experiment was made, in which the try of the robot is moved by the robot in accordance to the information obtained by computer vision and corrected by the NeuroFuzzy filter. In this second case, the robot tries to maintain the bottle in equilibrium over the bottle.

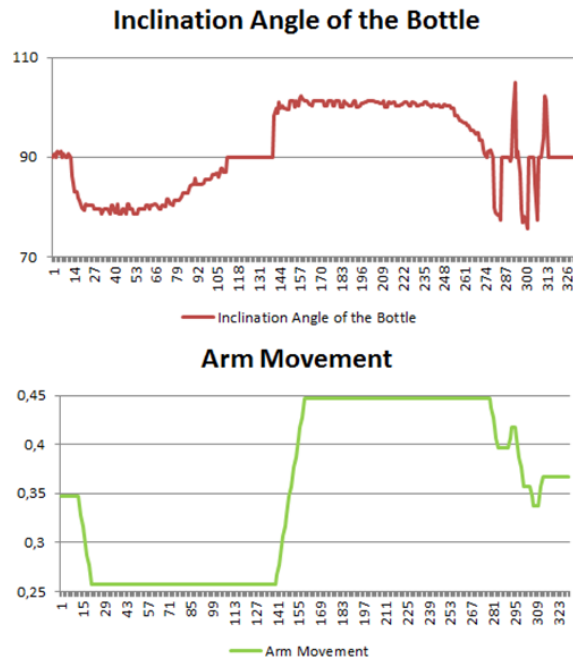


Figure 10: Corrections made by the arm chain to maintain the bottle equilibrium over the tray depending on the inclination angle.

As it is seen in Fig. 10, when the bottle tilts to one side the robot acts moving the arm in this direction, trying to recover the bottle equilibrium until it reaches the maximum length reachable by the arm.

Whereas, when the inclination angle of the bottle is in the other side, the arm moves to this other side in order to compensate this inclination and keep the balance of the bottle.

5 CONCLUSIONS

The conclusions obtained in the research developed and explained in this paper are three. They are exposed below:

- The characteristics of the bottle have been extracted by computer vision: Pre-processing of the image, the inclination angle of the object in each moment, and its movement characteristics.
- The error introduced in the data by the computer vision techniques has been corrected by using a NeuroFuzzy filter.
- Closing the control loop. With the information acquired and corrected, a closed loop has been made. To achieve it, the programs have been implemented in the humanoid robot TEO.

Acknowledgements

The research leading to these results has received funding from the ROBOHEALTH-A project (DPI2013-47944-C4-1-R) funded by Spanish Ministry of Economy and Competitiveness and from the RoboCity2030-III-CM project (S2013/MIT-2748), funded by Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid and cofunded by Structural Funds of the EU.

References

- [1] Chua, J. L., Chang, Y. C., Jaward, M. H., Parkkinen, J., Wong, K. S. (2014, December). Vision-based hand grasping posture recognition in drinking activity. In *Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), 2014 International Symposium on* (pp. 185-190). IEEE.
- [2] Ohno, K., Kensuke, K., Takeuchi, E., Zhong, L., Tsubota, M., Tadokoro, S. (2011, December). Unknown object modeling on the basis of vision and pushing manipulation. In *Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2011 IEEE International Conference on* (pp. 1942-1948). IEEE.
- [3] Martínez, S., Monje, C. A., Jardón, A., Pierro, P., Balaguer, C., Munoz, D. (2012). Teo: Full-size humanoid robot design powered by a fuel cell system. *Cybernetics and Systems*, 43(3), 163-180.
- [4] Jagannathan, L., Jawahar, C. V. (2005, August). Perspective correction methods for camera based document analysis. In *Proc. First Int. Workshop on Camera-based Document Analysis and Recognition* (pp. 148-154).
- [5] Kumar, S., Micheloni, C., Piciarelli, C., Foresti, G. L. (2010). Stereo rectification of uncalibrated and heterogeneous images. *Pattern Recognition Letters*, 31(11), 1445-1452.
- [6] Wu, H. H. P., Yu, Y. H. (2005). Projective rectification with reduced geometric distortion for stereo vision and stereoscopic video. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 42(1), 71-94.
- [7] Slembrouck, M., Heyvaert, M., Van Cauwe-laert, D., Van Hamme, D., Veelaert, P., Philips, W. (2012, October). Time complexity of traditional vision algorithms on a block-based image processor (BLIP). In *Distributed Smart Cameras (ICDSC), 2012 Sixth International Conference on* (pp. 1-6). IEEE.

- [8] Trenaman, A., Barry, D., Vernon, D. (1996). An Analysis of Strategies to Reduce Computational Complexity and Processing Time in Industrial Optical Data Processing and Analysis. Proceedings of OEPE'96.
- [9] Kim, Y. H., Ahn, S. C., Kwon, W. H. (2000). Computational complexity of general fuzzy logic control and its simplification for a loop controller. Fuzzy Sets and Systems, 111(2), 215-224.
- [10] Martínez de la Casa Díaz, S. (2012). Human inspired humanoid robots control architecture.
- [11] Jang, J.-S. R., "ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 23, No. 3, pp. 665-685, May 1993.
- [12] Gómez Vargas, E., Obregón Neira, N., Socarras Quintero, V. (2010). Application of neuro-fuzzy ANFIS model vs neural network, to the predictive monthly mean flow problem in the Bogotá river in Villapinzón. Tecnura, 14(27), 18-29.

Deben estar ordenadas por orden alfabético y justificadas con la sangría correspondiente.

PLATAFORMA BASADA EN LA INTEGRACIÓN DE MATLAB® Y ROS PARA LA DOCENCIA DE ROBÓTICA DE SERVICIO

Carlos G. Juan, Álvaro García, Jose M. Vicente, Jose M. Sabater-Navarro
Grupo de Neuroingeniería Biomédica de la Universidad Miguel Hernández de Elche, Av. Universidad, s/n,
03202, Elche, España
j.sabater@umh.es

Resumen

En este artículo se presenta una propuesta docente basada en una plataforma compuesta por Matlab® y ROS desarrollada en la asignatura “Robótica de Servicio” en la titulación de Máster Universitario en Ingeniería Industrial de la Universidad Miguel Hernández de Elche. Se ha preparado un proceso práctico en el que se introduce al alumno en el desarrollo de algoritmos de navegación, así como la interacción con los sistemas sensoriales del robot y sus actuadores. La componente innovadora se encuentra en el uso de una herramienta previamente conocida por el alumno (Matlab®) integrada con una plataforma más compleja y realista (ROS) para poder ofrecer la formación práctica adecuada con los recursos habituales.

Palabras Clave: Robótica, docencia, navegación, simulación

1 INTRODUCCIÓN

El entorno de desarrollo Matlab® [3] es una herramienta optimizada para la computación numérica ampliamente utilizada en múltiples ámbitos de la ingeniería, matemáticas, física, y diversas ciencias experimentales, especialmente en entornos académicos e investigadores. Ofrece una elegante y conveniente combinación de facilidad de programación, rapidez de desarrollo, modularidad e integración con una gran variedad de plataformas, circunstancia que justifica su extendido uso, sobre todo en universidades y centros de investigación.

Por otro lado, ROS (*Robot Operation System*) [5] es una plataforma de código abierto que presenta una adecuada recopilación de herramientas para el desarrollo de software para robótica. Está orientada al control de robots y la comunicación entre los diferentes módulos de un sistema robótico.

Una de las mayores ventajas de este sistema es que ROS define los diferentes procesos involucrados en un proyecto como nodos software, los cuales pueden

enviar, recibir y multiplexar datos fácilmente. Esto se puede realizar de manera periódica y automática desde nodos servidor a nodos subscritor (mediante *topics*) o de forma aislada bajo petición de nodos cliente a nodos servidor (mediante *services*).

La robótica es una asignatura que está ganando presencia en los ámbitos formativos a pasos agigantados, y su carácter técnico, actualizado e innovador abre el debate sobre la mejor manera de enseñarla [2]. En este sentido, la innovación docente se postula como imprescindible, y es conveniente revisar las propuestas más recientes, e.g. [1], [6]. Esta innovación no sólo se da en la forma de la docencia, también en los recursos y su optimización, puesto que no siempre se cuenta con el equipamiento necesario. En este ámbito, el uso de simuladores a menudo se presenta como la mejor solución [4].

Este trabajo presenta una estrategia didáctica innovadora que combina ROS con Matlab® para la docencia de la robótica en la asignatura Robótica de Servicio del Máster Universitario en Ingeniería Industrial [7]. La robótica es una disciplina joven en constante evolución y actualización, y el uso de ROS es cada vez más extendido debido a sus numerosas ventajas. Sin embargo, es una plataforma compleja basada en Linux, y dar una correcta formación a los alumnos en este sentido requiere un tiempo y unos recursos de los que no se dispone en los programas educativos habituales.

No obstante, desde la versión R2015a Matlab® cuenta con los comandos de ROS integrados si se instala la MathWorks Robotics System Toolbox. Esto permite que los alumnos puedan interactuar con plataformas ROS desde Matlab®, un sistema que conocen y con el que se sienten cómodos, eliminando así esta necesidad de formación previa y permitiendo centrar el curso en la docencia de la robótica.

En el presente artículo se expone el proceso docente propuesto y los resultados de su aplicación. En el Apartado 2 se detallan las herramientas utilizadas y se describe la plataforma empleada, el entorno de simulación y el modelo del robot considerado. En el apartado 3 se narra la implementación del proceso

docente, mientras que en el Apartado 4 se exponen los resultados obtenidos. Por último, el apartado 5 ofrece las conclusiones y consideraciones oportunas.

2 DESCRIPCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS

Como se ha comentado, para poder implementar la integración de ROS y Matlab® es necesario contar con la versión 2015a (o posterior) del software de computación numérica. Este software fue instalado en ordenadores con sistema operativo Windows® por comodidad de cara al alumnado. Por otro lado, ROS se ejecuta sobre una distribución de Linux, en nuestro caso Ubuntu 14.04 LTS con ROS Indigo Igloo.

Para conectar ambas plataformas lo más cómodo es dotar a la unidad Linux de una dirección IP fija. Así, se cuenta con tantas unidades de Matlab® como requiera el proceso docente, basta con establecer la comunicación con el servidor ROS mediante UDP, asegurándose de que todas las unidades se encuentran en la misma área local.

Además, en el escenario ideal para ofrecer unas prácticas satisfactorias de un curso de robótica, los alumnos deberían manejar un robot real mediante nuestra plataforma. Sin embargo, por una simple cuestión de limitación de recursos, no resulta viable tener tantas unidades robóticas como alumnos. Así, en el sistema operativo ROS se ha integrado el simulador gratuito Gazebo, para simular el comportamiento de un determinado robot en un escenario real. En la Figura 1 se puede ver un esquema del sistema propuesto.

A continuación se presenta el entorno de simulación escogido para fines docentes así como el robot simulado con el fin de poner en práctica los conceptos vistos en el curso.

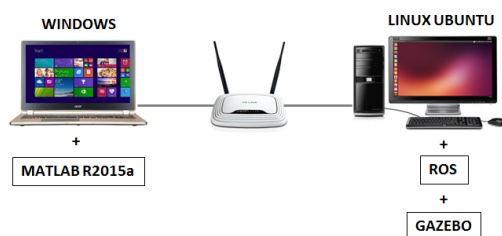


Figura 1: Esquema del sistema propuesto

2.1 ENTORNO DE SIMULACIÓN GAZEBO

Gazebo es un simulador gratuito que encuentra su mayor campo de aplicación en el diseño de robots. Concretamente, ofrece la posibilidad de modelar con precisión y efectividad poblaciones de robots con

cualquier configuración en entornos complejos, tanto de interior como de exterior.

El simulador está basado en herramientas open source. La física está fundamentada en la dinámica del sólido-rígido mediante recursos como ODE o Bullet. El renderizado gráfico se realiza mediante OpenGL (OGRE) y las interfaces cuentan con plugins e IPCs basados en Google Protobuf y Boost ASIO. En cuanto a las interfaces de usuario, son de tipo GUI por comodidad, basadas en plataformas como QT o CEGUI. A continuación se puede observar un esquema de la arquitectura principal de Gazebo.

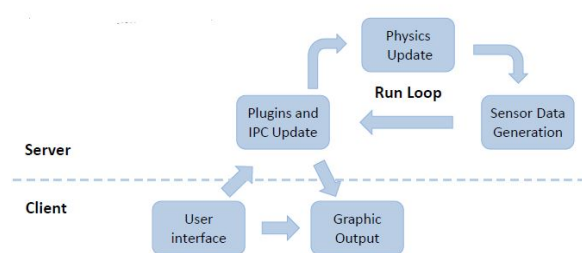


Figura 2: Arquitectura del simulador Gazebo

Las posibilidades que ofrece Gazebo para sus entornos son muy variadas. Se distinguen diversos tipos de elementos de manera jerárquica, como sensores que pueden recoger datos externos de otro dispositivo, objetos visuales que conforman los gráficos u objetos de colisión, que definen superficies que no pueden ser rebasadas. En un nivel superior se definen los enlaces, que combinan objetos visuales y de colisión, y articulaciones, que definen restricciones entre diferentes enlaces. Por encima se encuentran los modelos, que recopilan enlaces, articulaciones y sensores. Por último, los mundos reúnen modelos, configuraciones para los elementos de luz y propiedades globales.

La conveniencia de Gazebo es su integración con ROS. Para acceder a la interfaz de uso de ROS con el simulador Gazebo hay que instalar los paquetes correspondientes, los cuales se encuentran en la librería GAZEBO_ROS_PKGS. Con esto se puede enviar y recibir estructuras de datos para interactuar con Gazebo desde ROS o establecer sensores, motores y componentes dinámicos reconfigurables en Gazebo, entre otras funcionalidades.

2.2 ROBOT PIONEER DX-2

Como se ha comentado anteriormente, aunque lo deseable en un curso de robótica es enriquecer la formación ofrecida mediante su aplicación en robots y entornos reales, las limitaciones de recursos a menudo obligan a buscar soluciones alternativas, con frecuencia basadas en la simulación.

En el proceso docente presentado se proporciona a los discentes un determinado escenario en el que se ha posicionado un robot, mediante el entorno de simulación Gazebo. El objetivo fundamental es que los alumnos realicen la comunicación adecuada con el robot para implementar el control mediante Matlab®, y así poder aplicar los conceptos estudiados mediante un entorno sencillo y que les es familiar, sin la necesidad de invertir un tiempo del que no se dispone en enseñarles ROS. El robot escogido para tal fin es el Pioneer DX-2, el cual se puede ver en la Figura 3.



Figura 3. Robot Pioneer DX-2

Se trata de un robot comúnmente empleado en la educación y la formación en robótica, debido a su sencillez y facilidad de uso. Cuenta con dos ruedas motrices con motores independientes más una tercera rueda pasiva de apoyo. El control independiente de las ruedas motrices le permite girar y desplazarse en cualquier dirección. En la Figura 4 aparece un esquema de la parte inferior donde se aprecia esta configuración.

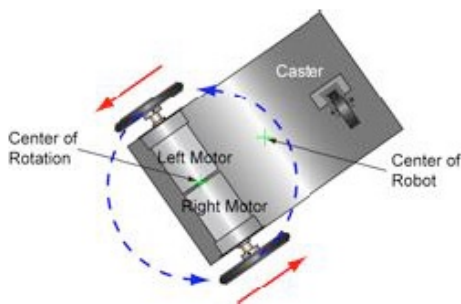


Figura 4. Esquema de la parte inferior del robot

El robot presenta una anchura máxima (de rueda a rueda) de 0.39 m (0.277 m sin las ruedas) y una longitud de 0.445 m. Las ruedas motrices tienen un diámetro de 0.22 m y están separadas 0.3 m de la rueda de apoyo.

En cuanto a los sensores, este robot habitualmente cuenta con anillos de sonares tanto en la parte delantera como en la trasera (como se puede apreciar en la Figura 3). No obstante, como en esta ocasión el robot se modela en un entorno de simulación, con fines docentes se han sustituido los sonares por un sensor láser Hokuyo 2D, el cual proporcionará la información necesaria sobre los obstáculos que se presentan en el entorno cercano del robot, y por tanto permitirá su control y navegación. En la Figura 5 se

muestra un ejemplo del funcionamiento del sensor láser Hokuyo 2D simulado en Gazebo.

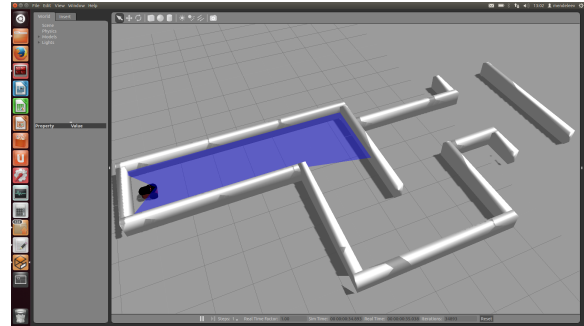


Figura 5. Sensor láser Hokuyo 2D simulado en Gazebo

La figura siguiente muestra el esquema rqt de las comunicaciones entre Matlab y Gazebo para la ejecución de la práctica.

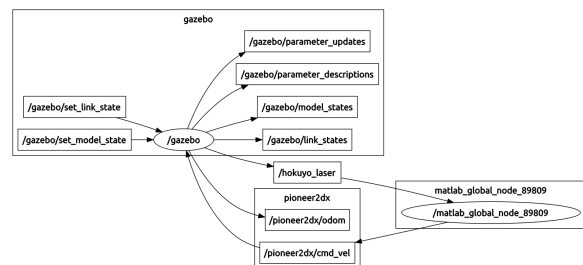


Figura 6. Esquema rqt

Como ejemplo, se muestra parte del código del fichero .sdf de definición del modelo del robot Pioneer DX-2.

```
<?xml version='1.0'?>
<sdf version='1.4'>
  <model name="mobile_base">
    <link name="chassis">
      <pose>0 0 .25 0 0 0</pose>

      <inertial>
        <mass>20.0</mass>
        <pose>-0.1 0 -0.1 0 0 0</pose>
        <inertia>
          <ixx>0.5</ixx>
          <iyy>1.0</iyy>
          <izz>0.1</izz>
        </inertia>
      </inertial>

      <collision name="collision">
        <geometry>
          <box>
            <size>2 1 0.3</size>
          </box>
        </geometry>
      </collision>

      <visual name="visual">
        <geometry>
          <box>
            <size>2 1 0.3</size>
          </box>
        </geometry>
      </visual>

    </link>
  </model>
</sdf>
```


3 PROPUESTA DOCENTE

Paralelamente al desarrollo teórico del curso, se ha desarrollado la componente práctica mediante la plataforma ROS-Matlab® propuesta y el simulador Gazebo con el modelo del robot Pioneer DX-2 con sensor láser Hokuyo 2D con fines ilustrativos. Tras unas primeras sesiones de aproximación a la plataforma consistentes en sencillos ejercicios, se ha ideado una práctica basada en proyecto por grupos de 2 o 3 alumnos para resolver un caso realista, la cual ha sido el fundamento de la evaluación del curso.

Concretamente, al alumnado se le ha presentado un entorno que modela un laberinto, en cuyo interior se ha posicionado el modelo del robot escogido. Las tareas a realizar consisten en establecer la correcta comunicación con el robot a través de Matlab® (mediante los comandos de MathWorks Robotics System Toolbox), para obtener la información del sensor láser y de la posición y orientación actuales del robot, identificar la configuración del entorno e implementar el control del robot de manera que pueda avanzar e ir navegando hasta que consiga salir del laberinto, y enviar los datos correspondientes a los actuadores del robot. En la Figura 5 se puede apreciar una captura del entorno propuesto con el robot en su interior, mientras que en la Figura 7 aparece el esquema del flujo de la información propuesto.

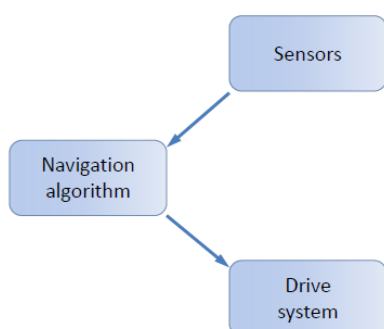


Figura 7. Flujo de la información

Para implementar el algoritmo de navegación, el software desarrollado por los alumnos en el entorno Matlab® debe subscribirse a los *topics* de ROS /hokuyo_laser y /pioneer2dx/odom. En el primero de ellos se publican los valores tomados por el sensor láser, mientras que en el segundo se publican la posición y orientación actuales del robot. Además, el software debe publicar un nuevo *topic*, pioneer2dx/cmd_vel, con los comandos para el movimiento del robot. A este *topic* debe estar suscrito el modelo del robot en Gazebo.

Los comandos para el movimiento del robot se componen de dos velocidades, una lineal (desplazamiento hacia delante) y una angular (giro hacia derecha o izquierda). Dado que solo hay dos ruedas directrices y cada una tiene un motor independiente, estableciendo los valores y los signos

adecuados para cada una de estas dos velocidades se puede conseguir que el robot se desplace en cualquier dirección y sentido. Como medida de seguridad, se establece que las velocidades jamás podrán ser superiores a 1 m/s (lineal) o 1 rad/s (angular).

En cuanto al laberinto, se proporciona una primera versión a los discentes para que puedan elaborar su proyecto e ir comprobando el funcionamiento, corrigiendo errores y optimizando el software. El laberinto se simula en Gazebo y se garantiza que la anchura de los pasillos es de 2 m, desde una pared hasta la opuesta. Además, se asegura que para resolverlo tan solo será necesario implementar giros tanto a derecha como a izquierda de 90°, intersecciones en T o cambios de sentido (giros de 180°).

Un video con la demostración del ejemplo mostrado a los alumnos puede verse en:

<https://youtu.be/SSGLPlawTm4>

Tras las correspondientes sesiones para el desarrollo de los proyectos, se realiza la evaluación. Para ello, cada grupo debe realizar una presentación oral en la que exponga el trabajo realizado, prestando especial atención al algoritmo de navegación y las comunicaciones Matlab®-ROS implementadas. En estas presentaciones se valora positivamente el uso de gráficos ilustrativos, así como el diseño modular del software, desglosando el algoritmo en subfunciones.

Seguidamente, el sistema diseñado por cada grupo será puesto en práctica en un nuevo entorno con un laberinto diferente (hasta el momento desconocido por los alumnos). En esta etapa se valorará la efectividad de los sistemas desarrollados a la hora de salir del laberinto, el número de colisiones con las paredes y, con especial interés, el tiempo que tarda cada robot en salir del laberinto. Se premiará al grupo que consiga salir en menor tiempo.

4 RESULTADOS

En el curso han participado un total de 17 alumnos, por lo que para la evaluación se han configurado 7 grupos: 4 grupos de 2 alumnos y 3 grupos de 3 alumnos. En términos generales, los trabajos presentados han sido satisfactorios, todos los grupos han desarrollado su algoritmo de navegación y han intentado darle el carácter modular buscado, aunque no todos han tenido éxito en la ejecución. Por otro lado, las comunicaciones Matlab®-ROS se han llevado a cabo correctamente en la totalidad de los casos, tal y como perseguía uno de los objetivos principales de esta propuesta.

En la figura 8 se muestra parte del código Matlab generado por un equipo de estudiantes para la

navegación del robot ejemplo en un laberinto con las características del laberinto planteado:

```
function Robot

    % Creation of the node with a custom name
    TestNode = robotics ros.Node('Robot');

    % Creation of the subscribers with the name of the
    topics (first parameter)
    % and the message format (second parameter). A
    different subscriber is
    % needed for each topic
    Laser = rossubscriber('hokuyo_laser',
    'sensor_msgs/LaserScan');
    %Posicion = rossubscriber('pioneer2dx/odom',
    'nav_msgs/Odometry');

    % Creation of the publisher with the name of the new
    topic (first parameter)
    % and the message format (second parameter). As for
    the subscribers, a
    % different publisher is needed for each new topic
    Movimiento = rospublisher('pioneer2dx/cmd_vel',
    'geometry_msgs/Twist');

    % Infinite loop to maintain active the data exchange
    while(1)

        % Creation of the input messages and reception
        of the entry data
        InputMessage1 = receive(Laser);
        %InputMessage2 = receive(Posicion);

        % Algoritmo de Navegacion
        Rango = InputMessage1.Ranges;
        %
        Pose = InputMessage2

        FRONT = 0;
        for(i=283:358)
            if Rango(i)<1.25%0.7775
                FRONT = 1;
            end
        end

        <...>

        if(FRONT==0)
            % Creation of the output message and filling
            of the variables
            OutputMessage = rosmensaje(Movimiento);
            OutputMessage.Linear.X = 0.5;
            OutputMessage.Angular.Z = 0;
            if(RIGHT3==0)

        <...>

        % Sending the message
        send(Movimiento, OutputMessage);

        end
    end
end
```

Figura 8. Código Matlab propuesto por un grupo de alumnos

Por ejemplo, uno de los algoritmos de navegación presentados consistía en la obtención de las distancias del robot a las paredes laterales y frontal. Así, la distancia a la pared frontal se evaluaba y se comprobaba si se encontraba por debajo de un valor umbral (0.7775 m, para intentar mantener el robot centrado con respecto al resto de paredes). En caso negativo se permitía el avance frontal, mientras que en caso positivo se detenía el robot y se evaluaba si la distancia a la pared derecha era superior a 2 m, lo que

suponía que no había obstáculos a la derecha. En este caso, se iniciaba la rotación hacia la derecha. En caso negativo, se realizaba el mismo proceso respecto de la pared izquierda. En el caso de no encontrar libre ninguna dirección, se permitía el giro a la derecha para buscar otra posición. Todas estas rotaciones se mantenían hasta que la distancia a la pared frontal superaba el valor umbral establecido. En la Figura 9 se puede apreciar el diagrama de flujo propuesto por los alumnos., y en la Figura 10 se muestra una captura de pantalla de su robot resolviendo el laberinto inicial.

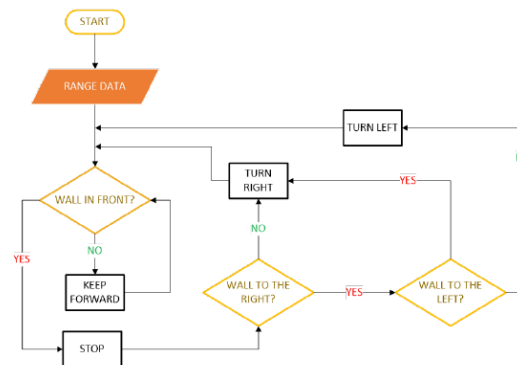


Figura 9. Diagrama de flujo propuesto por un grupo de alumnos

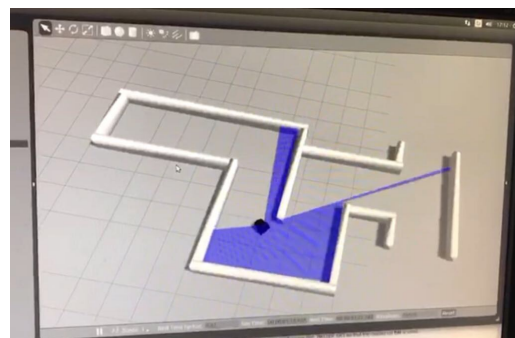


Figura 10. Captura de pantalla del robot resolviendo el laberinto inicial

En cuanto a la evaluación del funcionamiento de los sistemas desarrollados en un laberinto desconocido, los resultados obtenidos han sido variados. Cinco grupos consiguieron salir del laberinto con diferentes tiempos y números de colisiones, mientras que los algoritmos de dos de los grupos produjeron fallos de ejecución a lo largo de la prueba que les impidieron lograr el objetivo, en ambos casos en un punto del recorrido en el que se requería un giro de 180°, en el que el robot entró en un bucle de giro continuo. En la Tabla 1 se muestra un resumen de los resultados del proceso de evaluación.

Tabla 1: Resultados de la evaluación

Grupo	Conseguido	Colisiones	Tiempo (s)
1	SÍ	1	52
2	SÍ	0	45
3	NO	-	-
4	SÍ	0	43
5	SÍ	5	73
6	SÍ	1	58
7	NO	-	-

5 CONCLUSIONES

A la vista de los resultados expuestos, la valoración de la propuesta docente es positiva. La robótica es una disciplina que aúna una considerable carga teórica con una fuerte componente práctica, siendo la segunda imprescindible para la correcta comprensión de la primera. En este artículo se ha presentado una propuesta para solventar los problemas de recursos materiales y temporales a los que el ámbito docente tiene que hacer frente con más frecuencia de la deseable, y los resultados han mostrado un alto grado de consecución de los objetivos que lleva implícito un resultado satisfactorio del proceso docente.

Es de destacar la motivación extra que generan en el alumnado este tipo de propuestas, que consiguen acercarlo al entorno más realista posible sin requerirle un esfuerzo excesivo, y le permite centrarse en las enseñanzas propias del curso. Además, la componente competitiva siempre es un aliciente para todos los participantes, quienes se implican más y se interesan en mayor grado por todos los aspectos del curso. El hecho de poder ofrecer una formación práctica ajustada a los conceptos del curso que el alumno lleva a cabo mediante una herramienta que conoce y domina como es Matlab® y que le incita a mayor participación y motivación es muy recomendable.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer la financiación recibida por parte del Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto DPI2013-47196-C3-2. Carlos G. Juan quiere expresar su gratitud al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte por la financiación recibida a través del programa de Formación de Profesorado Universitario (FPU) en su convocatoria de 2014, mediante la solicitud FPU14/00401.

Referencias

- [1] Agostini, A., Torras, C. y Wörgötter, F., (2017) “Efficient interactive decision-making framework for robotic applications”, *Artificial Intelligence*, vol. 247, pp. 187-212.
- [2] Kucuk, S. y Sisman, B., (2017) “Behavioral patterns of elementary students and teachers in one-to-one robotics instruction”, *Computer and Education*, vol. 111, pp. 31-43.
- [3] MathWorks, (2017) Matlab. En línea: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>. [Último acceso: 25 mayo 2017].
- [4] Plaza, J., Quevedo, M. y Matellán, V., (2009) “Use of simulators in the teaching of mobile robotics [Uso de simuladores en docencia de robótica móvil]”, *Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*, vol. 4, nº 4, pp. 268-277.
- [5] ROS, (2017) ROS. En línea: <http://www.ros.org/>. [Último acceso: 25 mayo 2017].
- [6] Sooraksa, P., Sakornthanant, S., Jansri, A. y Klomkarn, K., (2016) “Tree robot: An innovation for STEAM education”, *IEEE International Conference on Real-Time Computing and Robotics, RCAR*, Angkor Wat, Camboya, pp. 338-341.
- [7] Universidad Miguel Hernández, (2017) Robótica de Servicio. En línea: http://www.umh.es/contenido/pdi/:asi_m_2987/datos_es.html. [Último acceso: 25 mayo 2017].

ESTIMADORES DE FUERZA Y MOVIMIENTO PARA EL CONTROL DE UN ROBOT DE REHABILITACIÓN DE EXTREMIDAD SUPERIOR

Aitziber Mancisidor Asier Zubizarreta Itziar Cabanes Pablo Bengoa Asier Brull
{aitziber.mancisidor, asier.zubizarreta, itziar.cabanes, pablo.bengoa, abrull001}@ehu.eus

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática,
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao, UPV-EHU

Resumen

Con el fin de controlar adecuadamente los robots de rehabilitación, es imprescindible conocer la fuerza y el movimiento de interacción entre el usuario y el robot. Sin embargo, la medición directa a través de sensores de fuerza y posición no sólo aumenta la complejidad del sistema, sino que eleva el coste del dispositivo. Como alternativa a la medición directa, en este trabajo, se presentan nuevos estimadores de fuerza y movimiento para el control del robot de rehabilitación de extremidades superiores Universal Haptic Pantograph (UHP). Estos estimadores están basados en el modelo cinemático y dinámico del robot UHP y en las mediciones de sensores de bajo coste.

Con el objetivo de demostrar su eficacia, se han realizado varias pruebas experimentales. Estas pruebas comparan la respuesta del controlador con sensores adicionales y con los nuevos estimadores de fuerza y movimiento. Los resultados han revelado que el rendimiento del controlador es similar con los dos enfoques (inferior a 1N de diferencia en el error cuadrático medio). Esto indica que los estimadores de fuerza y movimiento propuestos pueden facilitar la implementación de controladores de robots de rehabilitación.

Palabras clave: Estimador de fuerza, estimador de movimiento, control de impedancia, control de fuerza, robot de rehabilitación, validación experimental.

1. INTRODUCCIÓN

Las alteraciones motoras son unas de las secuelas más frecuentes en personas que han sufrido un ataque cerebrovascular o ictus. El 80 % de los pacientes afectados por el ictus sufren algún déficit en su sistema motor [16]. Hoy en día, la forma más común de recuperar estas funcionalidades es realizar ejercicios de rehabilitación del miembro afectado. Sin embargo, con las técnicas convencionales, debido a limitaciones temporales, personales o económicas, en muchos casos, las horas de rehabilitación son limitadas.

Ante esta situación, los dispositivos robóticos han sido propuestos como una alternativa a los procedimientos convencionales de rehabilitación [18, 20]. Siendo muchos los dispositivos robóticos propuestos para la rehabilitación de extremidades superiores [3, 15] e inferiores [10, 19].

Una gran parte de estos trabajos se centra en el diseño mecánico de los dispositivos, analizando el tipo de estructura (serie o exoesqueleto) [2, 6], el número de grados de libertad, el tipo de actuadores [17], etc. Sin embargo, con el fin de asegurar que estos robots interactúen correctamente con el usuario, es imprescindible poseer un controlador adecuado y robusto. Un controlador apropiado puede mejorar el rendimiento del dispositivo robótico, mejorando significativamente el estado de recuperación del paciente. Por el contrario, el mal funcionamiento del controlador puede llegar a lesionar al usuario.

Las estrategias de control clásicas, como el control de posición, no consideran la dinámica de interacción entre el paciente y el robot, por lo que no son adecuadas para este tipo de aplicaciones. Para poder controlar esta interacción, es necesario implementar algoritmos de control avanzados que combinen mediciones de movimiento y fuerza. Los algoritmos basados en la impedancia mecánica del sistema, el control de impedancia [7], y su complementario el control de admitancia [11], son los más implementados.

El control de impedancia se basa en un controlador de fuerza con realimentación de posición, mientras que su complementario el control de admitancia es un controlador de posición con realimentación de fuerza. En ambos casos, controlan la relación fuerza/posición en todas las direcciones de movimiento. Además, poseen la capacidad de adaptarse al estado de recuperación de los pacientes, lo que los convierte en una de las mejores técnicas para dispositivos de rehabilitación [8].

Estos controladores avanzados de fuerza/posición precisan conocer los valores reales del movimiento y de la fuerza de interacción. Normalmente, estos valores se miden directamente usando sensores de fuerza y posición. Sin embargo, estos enfoques

causan varios inconvenientes [1, 5]: i) la colocación y el uso de los sensores introduce dificultades mecánicas y eléctricas, ii) las señales de los sensores requieren de un procesamiento adecuado debido al ruido y a su dependencia a la temperatura, y iii) en la mayoría de los casos, el precio de los sensores es muy elevado.

Otro enfoque implementado con éxito en varias aplicaciones robóticas industriales, es el uso de estimadores de fuerza y movimiento. Generalmente, estos estimadores se basan en la medición de sensores de posición de bajo coste, como encoders que miden el ángulo de rotación de los actuadores. Entre diferentes técnicas de estimación que se pueden encontrar en la bibliografía, las más extendidas se basan en el modelo cinemático y dinámico del dispositivo [4, 9].

En este contexto, en este trabajo, con el objetivo de reducir el coste y la complejidad del dispositivo robótico, se aplica el mismo concepto a los robots de rehabilitación. Se presentan estimadores de fuerza y movimiento para el robot de rehabilitación Universal Haptic Pantograph (UHP) [12, 13, 14]. El UHP es un robot de rehabilitación innovador para el entrenamiento completo de las extremidades superiores. Es decir, se usa para la rehabilitación de hombros, codos y muñecas en personas que sufren déficit motora después de un ictus.

El resto del artículo está estructurado de la siguiente manera. En la Sección II, se describe brevemente el UHP y se introducen los parámetros necesarios para la formulación de los estimadores. En la sección III se detallan los estimadores de fuerza y de movimiento. En la sección IV, se analizan y se validan experimentalmente estos estimadores. Finalmente, las ideas más importantes se resumen en las conclusiones.

2. ROBOT DE REHABILITACIÓN UHP

El Universal Haptic Pantograph (UHP) es un robot de rehabilitación para el entrenamiento de las extremidades superiores (Fig. 1). Una de sus principales ventajas es la posibilidad de variar su estructura mecánica mediante el uso de tres articulaciones bloqueables/desbloqueables. Esto permite ocho diferentes modos de entrenamiento, que pueden ser utilizados para rehabilitar todas las articulaciones del miembro superior [14].

Entre estas ocho configuraciones mecánicas o modos de operación, este trabajo se centra en uno de los más utilizados, en el modo ARM. En este modo, el UHP ejecuta movimientos planares de flexión/extensión en un plano xy [14]. Esto permite

rehabilitar los tres movimientos del hombro (rotación, flexión/extensión y abducción/aducción) y el movimiento de flexión/extensión del codo.

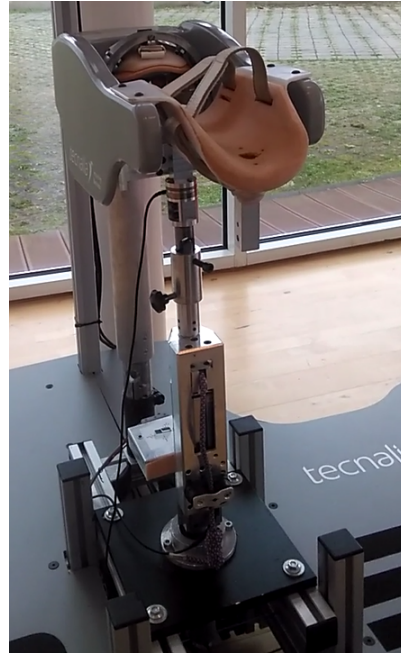


Figura 1: Robot de rehabilitación Universal Haptic Pantograph (UHP).

Mecánicamente, el UHP está compuesto por dos subsistemas: un sistema de accionamiento con componentes elásticos que genera fuerza y movimiento (Fig. 2), y una estructura cerrada en forma de pantógrafo donde el usuario interactúa con el UHP (Fig. 3).

Por lo que el movimiento del UHP es el resultado de las fuerzas ejercidas por el usuario sobre el pantógrafo (\mathbf{F}_{Cn}) y los pares ejercidos por los motores a través del sistema de accionamiento (τ_m). Los dos subsistemas están conectados entre sí, lo que les permite transmitir bilateralmente las fuerzas (\mathbf{F}_{Tr}) y los movimientos (\mathbf{P}_{Tr}) mostrados en las Figs. 2 y 3.

El sistema de accionamiento está formado por dos SEAs (Series Elastic Actuator) perpendiculares compuestos por dos motores rotativos Maxon RE40 (m_1 and m_2), cuatro muelles (M_A , M_B , M_C y M_D) y una serie de poleas con radio r_m , unidas a través de un sistema de transmisión por cable. Como resultado, el sistema es capaz de ejercer fuerza (\mathbf{F}_{Tr}) y movimiento (\mathbf{P}_{Tr}) en el pantógrafo en dos direcciones perpendiculares (x y y). En cada dirección, un motor rotativo genera un par que se transmite a través de los cables a una pareja de muelles. De forma parecida, los muelles transmiten las fuerzas y los movimientos al punto \mathbf{P}_{Tr} del pantógrafo (Fig. 2).

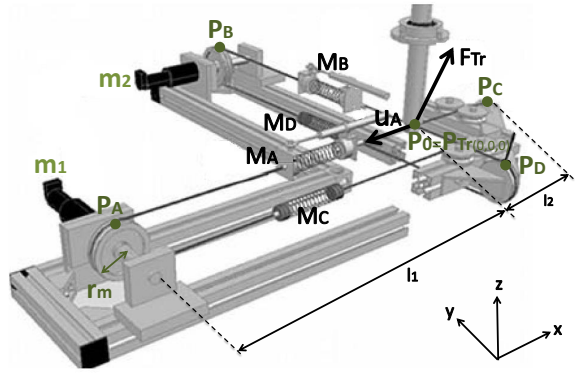
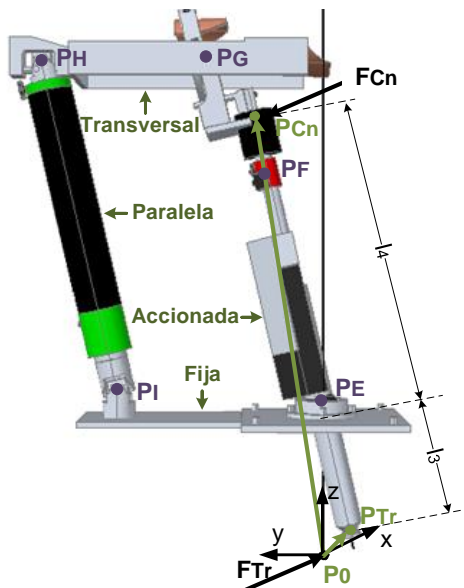


Figura 2: Sistema de accionamiento del UHP.

Como se muestra en la Fig. 3, el pantógrafo está compuesto por una estructura fija y tres barras móviles (accionada, transversal y paralela). Estas barras están unidas por cinco articulaciones (P_E , P_F , P_G , P_H y P_I), donde P_F , P_H y P_I son bloqueables/desbloqueables. El pantógrafo es accionado por el sistema de accionamiento en el punto de transmisión (P_{Tr}) y por el usuario en el punto de contacto (P_{Cn}).

En el modo ARM, la articulación P_F está bloqueado, por lo que la barra accionada actúa como un único elemento rígido desde P_{Tr} a P_G . Además, con el fin de permitir el movimiento de las barras transversal y paralela, las articulaciones P_H y P_I están desbloqueadas. De esta forma el pantógrafo es capaz de realizar movimientos cuasi-planares hacia delante, hacia atrás, hacia la izquierda y hacia la derecha.

Figura 3: Pantógrafo en modo ARM (P_F está bloqueada mientras P_H y P_I están desbloqueadas).

Por otro lado, la posición de equilibrio del UHP se logra cuando la barra accionada está en posición vertical, definiendo el origen (P_0) del marco de referencia, base que aparece en las Figs. 2 y 3.

3. ESTIMADORES DE FUERZA Y MOVIMIENTO PARA EL CONTROL DE IMPEDANCIA

Con el objetivo de realizar las tareas habituales de rehabilitación, se ha diseñado un controlador de impedancia (Fig. 4). Como se ha mencionado en la introducción de este artículo, el controlador de impedancia controla la relación dinámica entre la fuerza (F_{Cn}) y el movimiento (P_{Cn}) del punto de contacto. Es decir, calcula la fuerza de contacto deseada (F_{CnDes}) en función del error entre la posición real (P_{Cn}) y deseada (P_{CnDes}) del punto de contacto.

$$F_{CnDes} = (K_d + B_d s + M_d s^2) (P_{CnDes} - P_{Cn}) \quad (1)$$

donde K_d es la matriz de rigidez, B_d es la matriz de amortiguamiento y M_d es la matriz de inercias que definen la impedancia deseada del robot.

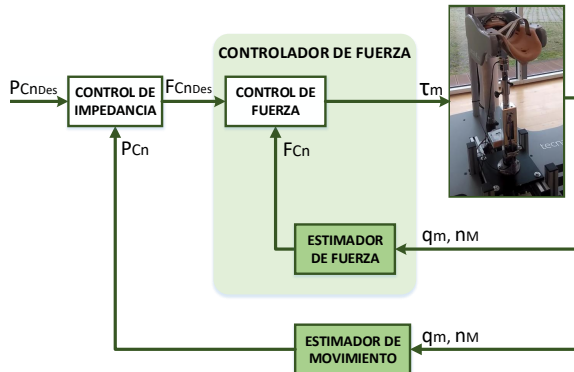


Figura 4: Controlador de impedancia del robot de rehabilitación UHP con estimadores de fuerza y movimiento.

Una vez calculada la fuerza deseada del punto de contacto (F_{CnDes}) a partir de la Ec. 1, se utiliza un controlador de fuerza para asegurar que la fuerza real de contacto (F_{Cn}) siga a la deseada (F_{CnDes}). Comúnmente, la fuerza real contacto (F_{Cn}) ha sido medida directamente por un sensor de fuerza. Sin embargo, este enfoque aumenta el coste y la complejidad mecánica y electrónica del dispositivo. Por lo tanto, con la intención de resolver esos inconvenientes, se ha utilizado un estimador de fuerza para sustituir a los sensores.

El estimador de fuerza propuesto utiliza el modelo dinámico del UHP y las mediciones de sensores comunes de bajo coste ya implementados en el

UHP: dos encoders ópticos integrados en los motores que miden su ángulo de rotación (q_{m_1} y q_{m_2}), y dos potenciómetros lineales que miden la longitud variable (n_{M_A} y n_{M_B}) de los muelles M_A y M_B . Además, esas señales se utilizan para estimar la posición del punto de contacto (\mathbf{P}_{Cn}), obteniendo un estimador de movimiento.

Ambos estimadores, de movimiento y fuerza, se detallarán en las siguientes subsecciones.

3.1. Estimador de Movimiento

El estimador propuesto calcula la posición real del punto de contacto (\mathbf{P}_{Cn}) basado en el modelo cinemático del UHP y las mediciones obtenidas de los encoders (q_{m_1} y q_{m_2}) y de los potenciómetros lineales (n_{M_A} y n_{M_B}).

En el modo ARM (Fig. 3), por su geometría específica, la posición del punto de contacto (\mathbf{P}_{Cn}) se relaciona con la posición del punto de transmisión (\mathbf{P}_{Tr}) como

$$\mathbf{P}_{Cn} = -\frac{l_3}{l_4}\mathbf{P}_{Tr} \quad (2)$$

donde l_3 es la distancia entre el punto de transmisión (\mathbf{P}_{Tr}) y la articulación \mathbf{P}_E , y l_4 es la distancia entre la articulación \mathbf{P}_E y el punto de contacto (\mathbf{P}_{Cn}).

Por lo tanto, como primer paso, se calcula la posición del punto de transmisión ($\mathbf{P}_{Tr} = [x_{Tr} \ y_{Tr} \ z_{Tr}]^T$) a partir del modelo del sistema de accionamiento (Fig. 2). Y a continuación, la posición del punto de contacto (\mathbf{P}_{Cn}) es estimado con la Ec. 2.

A partir del análisis del sistema de accionamiento (Fig. 2) se obtiene la longitud variable de los muelles M_A y M_B (n_{M_A} y n_{M_B}),

$$\begin{aligned} n_{M_A} &= l_A + q_{m_1} r_m - l_1 \\ n_{M_B} &= l_B + q_{m_2} r_m - l_1 \end{aligned} \quad (3)$$

donde l_1 es la distancia entre los motores y la posición de equilibrio del punto de transmisión (\mathbf{P}_0), r_m es el radio de las poleas, l_A es la distancia entre el punto \mathbf{P}_A y \mathbf{P}_{Tr} , y l_B es la distancia entre el punto \mathbf{P}_B y \mathbf{P}_{Tr} .

Los valores de l_A y l_B en función de la posición del punto de transmisión,

$$\begin{aligned} l_A &= \mathbf{P}_A \mathbf{P}_{Tr} = \sqrt{(l_1 + x_{Tr})^2 + y_{Tr}^2} \\ l_B &= \mathbf{P}_B \mathbf{P}_{Tr} = \sqrt{x_{Tr}^2 + (l_1 - y_{Tr})^2} \end{aligned} \quad (4)$$

Combinando las Ecs. 3 y 4,

$$\begin{aligned} \sqrt{(l_1 + x_{Tr})^2 + y_{Tr}^2} &= n_{M_A} - q_{m_1} r_m + l_1 \\ \sqrt{x_{Tr}^2 + (l_1 - y_{Tr})^2} &= n_{M_B} - q_{m_2} r_m + l_1 \end{aligned} \quad (5)$$

Además, de la Fig. 3 se obtiene que, debido a la articulación esférica \mathbf{P}_E , el punto de transmisión \mathbf{P}_{Tr} realiza un movimiento esférico y por tanto puede describirse como,

$$x_{Tr}^2 + y_{Tr}^2 + (l_3 - z_{Tr})^2 = l_3^2 \quad (6)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones definido en las Ecs. 5 y 6 se obtienen las coordenadas espaciales (x_{Tr} , y_{Tr} , z_{Tr}) del punto de transmisión \mathbf{P}_{Tr} . Y finalmente, introduciendo este valor en la Ec. 2, se calcula el valor de \mathbf{P}_{Cn} en función del ángulo de rotación de los motores (q_{m_1} y q_{m_2}) y la longitud variable de los muelles superiores (n_{M_A} y n_{M_B}).

3.2. Estimador de la Fuerza de Contacto

Una vez que se conoce el movimiento del punto de contacto (\mathbf{P}_{Cn}), se puede estimar la fuerza de contacto (\mathbf{F}_{Cn}) en ese punto. Para ello, se utilizará el modelo dinámico del UHP, la posición de \mathbf{P}_{Cn} y las mediciones de los mismos sensores utilizados para el estimador de movimiento (n_{S_A} , n_{S_B} , q_{m_1} y q_{m_2}).

Como sucede con el estimador de movimiento, debido a la geometría particular del UHP, en el modo de operación ARM (Fig. 3), la fuerza de contacto (\mathbf{F}_{Cn}) y la fuerza de transmisión (\mathbf{F}_{Tr}) tienen una relación definida por,

$$\mathbf{F}_{Cn} = \mathbf{T}_{ARM} \mathbf{F}_{Tr} \quad (7)$$

donde \mathbf{T}_{ARM} es la matriz de transformación definida como,

$$\mathbf{T}_{ARM} = -\frac{l_3}{l_4} \mathbf{I}_{3 \times 3} \quad (8)$$

donde l_3 es la distancia entre el punto de transmisión (\mathbf{P}_{Tr}) y la articulación \mathbf{P}_E , l_4 es la distancia entre la articulación \mathbf{P}_E y el punto de contacto (\mathbf{P}_{Cn}), y $\mathbf{I}_{3 \times 3}$ es una matriz de identidad de dimensión 3.

Por otro lado, a partir del análisis dinámico del sistema de accionamiento, se obtiene que la fuerza de transmisión (\mathbf{F}_{Tr}) es la suma de las fuerzas ejercidas por los cuatro muelles conectados al punto de transmisión (\mathbf{P}_{Tr}) (Fig. 2),

$$\mathbf{F}_{Tr} = \mathbf{F}_{M_A} + \mathbf{F}_{M_B} + \mathbf{F}_{M_C} + \mathbf{F}_{M_D} = \sum_{i=A}^D \mathbf{F}_{M_i} \quad (9)$$

La magnitud de la fuerza de cada muelle (F_{M_i}) depende de su constante de rigidez (k_{M_i}) y su longitud variable (n_{M_i}), mientras que su dirección (\mathbf{u}_i) depende del movimiento del punto de transmisión (\mathbf{P}_{Tr}).

$$\mathbf{F}_{M_i} = F_{M_i} \mathbf{u}_i = k_{M_i} n_{M_i} \mathbf{u}_i \quad (10)$$

donde \mathbf{u}_i es el vector unitario direccional de $\mathbf{P}_{Tr}\mathbf{P}_i$ para $i = A, B, C, D$ (Fig. 2).

En la Ec. 10 aún hay dos parámetros desconocidos, n_{M_C} y n_{M_D} . Estos parámetros, se calculan mediante el análisis de la geometría del sistema de accionamiento (Fig. 2). Siguiendo el procedimiento utilizado para el cálculo de n_{M_A} y n_{M_B} ,

$$\begin{aligned} n_{M_C} &= l_C + q_{m_1} r_m - l_2 \\ n_{M_D} &= l_D + q_{m_2} r_m - l_2 \end{aligned} \quad (11)$$

donde r_m es el radio de las poleas, l_2 es la distancia entre la posición de equilibrio del punto de transmisión (\mathbf{P}_0) y el punto \mathbf{P}_C (o \mathbf{P}_D) en la polea no actuada, l_C es la distancia entre los puntos \mathbf{P}_C y \mathbf{P}_{Tr} , y l_D es la distancia entre los puntos \mathbf{P}_D y \mathbf{P}_{Tr} . Además, l_C y l_D se pueden calcular como,

$$\begin{aligned} l_C &= \mathbf{P}_C \mathbf{P}_{Tr} = \sqrt{(x_{Tr} - l_2)^2 + y_{Tr}^2} \\ l_D &= \mathbf{P}_D \mathbf{P}_{Tr} = \sqrt{x_{Tr}^2 + (l_2 + y_{Tr})^2} \end{aligned} \quad (12)$$

Por lo tanto, combinando las Ecs. 7-12 se estima la fuerza de contacto (\mathbf{F}_{Cn}) entre el robot y el usuario a partir de las mediciones de los encoders y los potenciómetros lineales.

4. RESULTADOS DE VALIDACIÓN

Se han realizado tres pruebas experimentales para demostrar la eficacia de los estimadores de fuerza y movimiento propuestos. En las dos primeras, con el fin de validar el estimador de fuerza, sólo se ha utilizado el controlador de fuerza. Mientras que en el último se ha añadido el de impedancia. En todas ellas, se ha comparado el rendimiento del controlador con estimadores y con sensores adicionales que miden directamente la posición (\mathbf{P}_{Cn}) y la fuerza (\mathbf{F}_{Cn}) de contacto.

En la Tabla 1 se resumen los parámetros del prototipo UHP necesarios para la implementación de los estimadores.

El primer ensayo tiene como objetivo verificar que el controlador de fuerza con el estimador de fuerza funciona correctamente. Para ello, intentando emular a un paciente que intenta mantener la posición del robot constante, se ha bloqueado el

Tabla 1: Parámetros del prototipo UHP.

Parámetro	Valor
r_m	0,047m
k_{M_i}	4000N/m
l_1	0,575m
l_2	0,15m
l_3	0,18m
l_4	0,46m

pantógrafo en la posición de reposo ($\mathbf{P}_{Cn} = \mathbf{0}$). Y se ha seleccionado una referencia variable de la fuerza de contacto (\mathbf{F}_{CnDes}).

Normalmente, el UHP trabaja con frecuencias entre 0,1Hz y 1Hz [12]. Por lo que se han seleccionado tres señales sinusoidales con amplitud de 10N y periodo 10, 5 y 1 segundos (0,1Hz, 0,2Hz y 1Hz).

En la Fig. 5 se observan la fuerza de contacto deseada (\mathbf{F}_{CnDes}), y la respuesta del controlador con el sensor ($\mathbf{F}_{CnSensor}$) y con el estimador de fuerza ($\mathbf{F}_{CnEstimador}$) en el eje x.

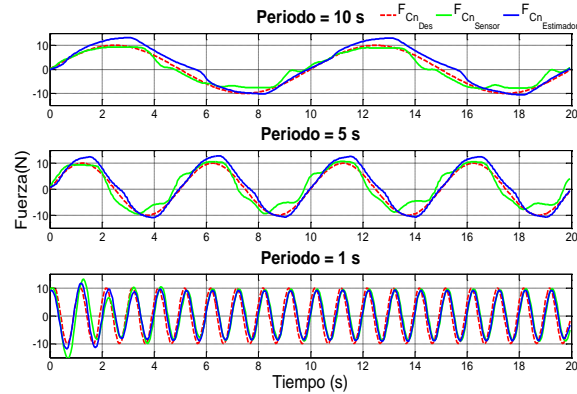


Figura 5: **Ensayo 1:** Validación del controlador de fuerza con estimador de fuerza con referencias sinusoidales de periodos de 10, 5 y 1 segundos.

Como se puede ver en la Fig. 5, en todos los ensayos realizados, el controlador ha sido capaz de seguir a la fuerza de referencia con un pequeño error. Al usar el sensor de fuerza, la media del error cuadrático medio (ECM) de los tres ensayos ha sido de 2,17N, mientras que con el estimador es de 2,22N.

El segundo ensayo tiene como objetivo validar el controlador de fuerza con estimador cuando la posición del robot UHP no es constante. Para ello, el usuario ha movido el prototipo UHP en todo el rango de movimiento del dispositivo robótico con

una velocidad aproximada de $1m/s$. Mientras que se ha seccionado una referencia de fuerza de $0N$ ($F_{CnDes} = 0N$).

La Fig. 6 muestra la fuerza de contacto deseada (F_{CnDes}), y la respuesta del controlador de fuerza con el sensor ($F_{CnSensor}$) y con el estimador de fuerza ($F_{CnEstimador}$) en el eje y .

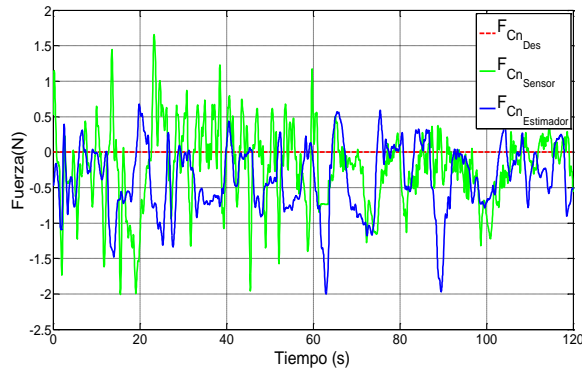


Figura 6: **Ensayo 2:** Validación del controlador de fuerza con estimador de fuerza con posición variable.

Como se puede observar en la Fig. 6, el rendimiento del controlador es parecido con las dos técnicas. Con el sensor de fuerza, el error medio de ECM en los ejes x y y es de $0,58N$, mientras que el error máximo es de $2,01N$. En el caso de usar el estimador, el error medio y el máximo son $0,61N$ y $2N$, respectivamente.

Finalmente, se utiliza el controlador de impedancia para validar el sistema completo con estimadores de fuerza y movimiento. En el controlador de impedancia (1), la fuerza de referencia (F_{CnDes}) se calcula en términos del error entre el movimiento real (P_{Cn}) y deseado (P_{CnDes}) del punto de contacto.

En la Fig. 7, se muestran los resultados del controlador de impedancia con sensores de fuerza y posición, mientras que la Fig. 8 muestra la respuesta del controlador al utilizar estimadores de fuerza y movimiento.

Con el fin de ejecutar una validación realista, las trayectorias deseadas de movimiento, que se pueden observar en las figuras 7 y 8, han sido diferentes trayectorias de $0,14m$, $0,11m$ and $0,05m$ de amplitud, seleccionadas aleatoriamente.

En los dos casos, el UHP ha ayudado al usuario a alcanzar el punto deseado (P_{CnDes}), realizando movimientos suaves y robustos. Además, con los dos métodos, el controlador ha sido capaz de seguir a la referencia deseada con un error inferior a $6N$. En el caso de utilizar los sensores el error ECM es de $4,92N$, mientras que con el estimador

es de $5,84N$.

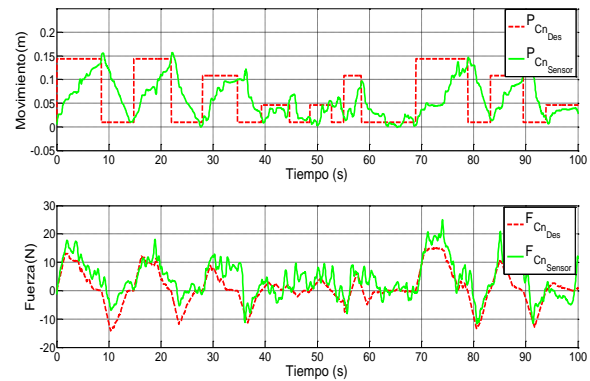


Figura 7: **Ensayo 3:** Resultados del controlador de impedancia con sensores de fuerza y posición.

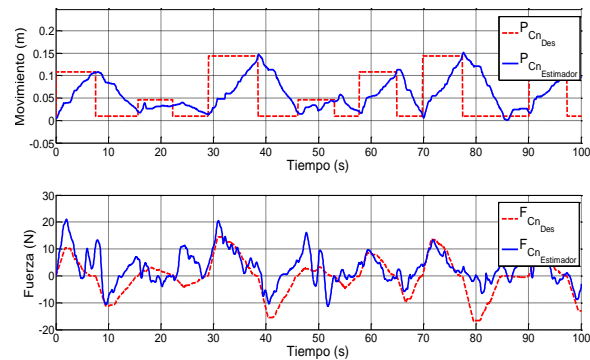


Figura 8: **Ensayo 3:** Resultados del controlador de impedancia con estimadores de fuerza y movimiento.

Como se puede observar, el rendimiento del controlador al utilizar los sensores es mejor que con los estimadores. Sin embargo, la diferencia entre los dos métodos es muy reducido, $0,05N$ en el primer ensayo, $0,03N$ en el segundo y $0,92N$ en el último.

Conviene señalar que en aplicaciones asistenciales y sanitarias, el cumplimiento y la seguridad del dispositivo son aspectos más críticos que el seguimiento preciso de la trayectoria. Por lo tanto, dependiendo del nivel de deterioro del paciente, así como del tipo de ejercicio de rehabilitación a ejecutar, se pueden aceptar errores RMS de posición y fuerza inferiores a $1cm$ y $6N$, que se obtuvieron en las pruebas experimentales.

A partir de los resultados experimentales se concluye que los estimadores de fuerza y movimiento propuestos son adecuados para el control de dispositivos robóticos de rehabilitación. Por lo que se pueden utilizar para sustituir sensores altamente cualificados de fuerza y movimiento.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado nuevos estimadores de fuerza y movimiento para el control de impedancia del robot de rehabilitación Universal Pantograph Haptic (UHP). El objetivo principal de estos estimadores es reemplazar los sensores extra de fuerza y posición que aumentan la complejidad mecánica y electrónica del dispositivo robótico, y disminuyen su asequibilidad.

Los estimadores propuestos están basados en el modelo cinemático y dinámico del robot, y en las señales medidas por sensores de bajo coste. En el caso del UHP, los sensores usados son: dos encoders ópticos que miden el ángulo de rotación de los motores, y dos potenciómetros lineales utilizados para medir la longitud variable de dos de los cuatro muelles del sistema de accionamiento.

Con el objetivo de verificar el rendimiento del controlador con los estimadores propuestos, se han realizado tres pruebas experimentales. Estas pruebas comparan la respuesta del controlador con sensores de fuerza y posición adicionales, y con los nuevos estimadores de fuerza y movimiento. Los resultados muestran que el controlador basado en los estimadores es capaz de seguir la fuerza deseada haciendo movimientos suaves y robustos. Mientras que la diferencia con el controlador con sensores es menor que 1N, es decir, es más pequeña que la que puede ser detectada por el ser humano.

Por lo que se puede concluir que el nuevo enfoque de control basada en estimadores de fuerza y movimiento es apropiada para el control de dispositivos robóticos de rehabilitación.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad MINECO & FEDER en el marco del proyecto DPI-2012-32882, así como por las becas PRE-2014-1-152 del Gobierno Vasco y BES-2013-066142 del Ministerio de Economía y Competitividad, el proyecto IT914-16 del Gobierno Vasco, el proyecto PPG17/56 de la UPV/EHU y por Euskampus Fundazioa.

Además, los autores desean expresar su agradecimiento al centro de investigación Tecnalia por su colaboración y por prestar su robot de rehabilitación Universal Haptic Pantograph.

Referencias

[1] H. Amini, V. Dabbagh, S. M. Rezaei, M. Zareinejad, N. A. Mardi, and A. A. D. Sarhan. Robust control-based linear bilateral teleoperation system without force sensor. *Journal*

of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 37(2):579–587, 2015.

- [2] M. Babaiasl, S. H. Mahdoun, P. Jaryani, and M. Yazdani. A review of technological and clinical aspects of robot-aided rehabilitation of upper-extremity after stroke. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, pages 1–18, jan 2015.
- [3] J. Brackenridge, L. V. Bradnam, S. Lennon, J. J. Costi, and D. A. Hobbs. A Review of Rehabilitation Devices to Promote Upper Limb Function Following Stroke. *Neuroscience and Biomedical Engineering*, 4(1):25–42, 2016.
- [4] A. Colome, D. Pardo, G. Alenya, and C. Torras. External force estimation during compliant robot manipulation. *International Conference on Robotics and Automation*, pages 3535–3540, 2013.
- [5] S. Etedali, H. A. Talebi, and A. D. Mohammadi. A robust force observer for robot manipulators subjected to external disturbance. *International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM)*, (1):539–544, 2015.
- [6] R. A. R. C. Gopura, D. S. V. Bandara, K. Kiguchi, and G. K. I. Mann. Developments in hardware systems of active upper-limb exoskeleton robots: A review. *Robotics and Autonomous Systems*, 75:203–220, 2016.
- [7] N. Hogan. Impedance Control: An Approach to Manipulation. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 107(1), 1985.
- [8] N. Jarrassé, T. Proietti, V. Crocher, J. Robertson, A. Sahbani, G. Morel, and A. Roby-Brami. Robotic Exoskeletons: A Perspective for the Rehabilitation of Arm Coordination in Stroke Patients. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8(947):1–13, 2014.
- [9] M. Linderroth, A. Stolt, A. Robertsson, and R. Johansson. Robotic force estimation using motor torques and modeling of low velocity friction disturbances. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 3550–3556, 2013.
- [10] W. Meng, Q. Liu, Z. Zhou, Q. Ai, B. Sheng, and S. S. Xie. Recent development of mechanisms and control strategies for robot-assisted lower limb rehabilitation. *Mechatronics*, 31:132–145, 2015.

- [11] N. Nordin, S.-q. Xie, and B. Wünsche. Assessment of movement quality in robot-assisted upper limb rehabilitation after stroke: a review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 11:137(1):1–23, 2014.
- [12] J. Oblak, I. Cikajlo, T. Keller, J. C. Perry, J. Veneman, and Z. Matja. The Role of Viscous Damping on Quality of Haptic Interaction in Upper Limb Rehabilitation Robot : A Simulation Study. *IFMBE Proceedings*, pages 383–386, 2010.
- [13] J. Oblak and Z. Matjačić. Design of a series visco-elastic actuator for multi-purpose rehabilitation haptic device. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 8:3:1–13, 2011.
- [14] J. C. Perry, J. Oblak, J. H. Jung, I. Cikajlo, J. F. Veneman, N. Goljar, N. Bizoviar, Z. Matjai, and T. Keller. Variable structure pantograph mechanism with spring suspension system for comprehensive upper-limb haptic movement training. *The Journal of Rehabilitation Research and Development*, 48(4):317–334, 2011.
- [15] T. Proietti, V. Crocher, A. Roby-Brami, and N. Jarrasse. Upper-limb robotic exoskeletons for neurorehabilitation: a review on control strategies. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 9:4–14, 2016.
- [16] B. Sheng, Y. Zhang, W. Meng, C. Deng, and S. Xie. Bilateral robots for upper-limb stroke rehabilitation: State of the art and future prospects. *Medical Engineering & Physics*, 38(7):587–606, 2016.
- [17] A. J. Veale and S. Q. Xie. Towards compliant and wearable robotic orthoses: A review of current and emerging actuator technologies. *Medical Engineering & Physics*, 38(4):317–325, 2016.
- [18] S. Xie. Advanced Robotics for Medical Rehabilitation. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 108:1–357, 2016.
- [19] T. Yan, M. Cempini, C. M. Oddo, and N. Vitiello. Review of assistive strategies in powered lower limb orthoses and exoskeletons. *Robotics and Autonomous Systems*, 64:120–136, 2015.
- [20] S.-H. Zhou, J. Fong, V. Crocher, Y. Tan, D. Oetomo, and I. Mareels. Learning control in robot-assisted rehabilitation of motor skills â“ a review. *Journal of Control and Decision*, 3(1):19–43, 2016.

Definiendo los elementos que constituyen un robot social portable de bajo coste

Marcos Maroto
University Carlos III of Madrid
marmarot@pa.uc3m.es

José Carlos Castillo
University Carlos III of Madrid
jocastil@ing.uc3m.es

Fernando Alonso-Martín
University Carlos III of Madrid
famartin@ing.uc3m.es

Juan José Gamboa
University Carlos III of Madrid
jgamboa@ing.uc3m.es

Sara Marqués Villaroya
University Carlos III of Madrid
smarques@ing.uc3m.es

Miguel Ángel Salichs
University Carlos III of Madrid
salichs@ing.uc3m.es

Resumen

Existen numerosos trabajos y estudios que evalúan la utilización de animales en terapias con personas que presentan problemas de desarrollo cognitivo o de aprendizaje. Estos métodos se utilizan principalmente en sesiones de rehabilitación orientadas a disminuir los efectos de enfermedades mentales como alzheimer, demencia o autismo. Cada vez son más los trabajos que tratan de incorporar robots sociales en sustitución de animales reales. Dado el tipo de aplicación a la que estos robots sociales están destinados, resulta un factor determinante que estos sistemas presenten una apariencia externa agradable para el usuario. En este sentido, son muchos los estudios que proponen el uso de robots con forma de animal o humanoide como medio de interacción con personas. Para ello, resulta fundamental el diseño de un robot que presente unas características concretas, fundamentalmente en aspectos relacionados con el tamaño, peso y apariencia de forma que el robot resulte fácilmente manejable y portable reduciendo su coste económico en la medida de lo posible. Este artículo realiza un repaso de los robots actuales utilizados en este tipo de aplicaciones, describiendo los elementos que debe incorporar, en su fase de diseño, un robot social de bajo coste orientado a aplicaciones de terapia y compañía a personas mayores y niños con enfermedades mentales.

Keywords—Robótica social, terapias robóticas, terapia con animales, robots humanoides, animales, diseño de robots.

1. Introducción

Actualmente, la robótica se encuentra inmersa en procesos donde no solo se pretende crear máquinas automáticas, sino dotarlas de un cierto grado de inteligencia y autonomía. En este sentido, la robótica social se centra en desarrollar la tecnología existente para permitir y facilitar la interacción humano-robot (HRI, por sus siglas en inglés) o robot-robot [1, 2]. Esta interacción normalmente pretende reproducir comportamientos propios de los animales y de los seres humanos en las máquinas para conseguir desarrollar vínculos afectivos

entre los mismos con el fin de mejorar su operabilidad en el mundo cotidiano. Además, pese a que la mayor parte de los robots desarrollados hasta ahora en robótica social han sido enfocados a la morfología y comportamientos de los seres humanos, reproduciendo comportamientos mediante imitación [3], cada vez son más los que poseen otras formas como pueden ser animales, aprovechando las capacidades que pueden aportar en campos como la medicina (aplicado en terapias) o actuando como sistemas que aportan compañía [4].

Por otro lado, la existencia en la actualidad de equipos y dispositivos electrónicos de bajo-medio coste, como minicomputadores y placas microcontroladoras de hardware y software libre, con buenas capacidades tecnológicas, permiten la realización de plataformas robotizadas que hace unos años resultaban difíciles de desarrollar debido principalmente a su alto coste económico.

2. Robots sociales para compañía y terapia

Todo robot social debe presentar unas características bien definidas, entre las que se deben encontrar mecanismos de interacción humano-robot (HRI), interacción con el mundo físico que le rodea, generación de emociones, apariencia externa agradable y realización aplicaciones que beneficien a las personas que los utilicen [5]. En este sentido, los robots sociales, en los últimos años, están adquiriendo una gran importancia en nuevos proyectos desarrollados en medicina [6]. Especialmente, un gran número de ellos son utilizados como sistemas de ayuda y compañía a personas mayores o niños con enfermedades mentales. Estos robots, en algunos casos, surgen como elemento de guía a los terapeutas en sesiones de rehabilitación mental o física o como elemento de compañía a personas con problemas mentales que normalmente se encuentran hospitalizadas o internas en centros especiales. Algunos de los robots más importantes en la actualidad destinados a este ámbito son PARO [7] y Aibo [11], Mini Maggie [14] y NAO [15] mostrados todos ellos en la Figura 1.

PARO (Personal Assistant Robot) [7] o NUKA (nombre en territorio europeo) nace en la década de los 90 como un robot de interacción social avanzada con forma de foca. Principalmente, se utiliza en hospitales y centros especializados en tratar a personas mayores con problemas mentales, aprovechando los efectos que tiene la terapia con animales reales [8]. La utilización de este tipo de robots disminuye la dificultad que supondría utilizar animales reales en hospitales y centros de atención de enfermedades mentales. Desde el punto de vista médico, quedaron demostrados los efectos positivos de realizar terapias con animales en enfermedades cognitivas como alzheimer o demencia [9]. Los estudios realizados recientemente con el robot PARO en experiencias reales con personas mayores enfermas muestran los resultados satisfactorios de realizar terapias este robot utilizando métodos utilizados en terapia con animales reales [10].

Como robot social de compañía surgió Aibo (Artificial Intelligence Robot) [11]. Desarrollado por Sony a finales de los años 90, Aibo representa el estándar de robot de compañía. Este robot ha adquirido diferentes formas durante su existencia, destacando principalmente con forma de cachorro de perro. Pese a que fue diseñado para su uso doméstico como robot mascota o de compañía, ha sido utilizado en multitud de aplicaciones como educación, robot futurista en películas o estudios de investigación. Como se puede comprobar en distintos trabajos de investigación [12, 13], ha sido estudiada la utilización de este robot como animal robótico de compañía con personas de todo tipo de edades para comprobar los efectos de la utilización de robots en sustitución de animales reales.

Mini Maggie es un robot social desarrollado por la Universidad Carlos III de Madrid para ayudar al terapeuta encargado de dirigir sesiones de rehabilitación con personas que presentan enfermedades mentales como alzheimer o demencia [14]. Para ello, incorpora mecanismos de interacción mediante voz con un sintetizador de texto o TTS (Text to Speech, de sus siglas en inglés) y un reconocedor de voz, distintos ejercicios que sirven para estimular mentalmente a los enfermos a través de una tableta, mecanismos de percepción del entorno mediante una cámara de visión 3D y diversos sensores y actuadores que permiten realizar movimientos e interactuar de una forma más realista con el usuario.

El robot humanoide NAO [15] ha sido utilizado para ayudar a niños autistas en numerosas terapias para mejorar las habilidades de comunicación e interacción de estos niños [16]. Otros estudios de investigación [17] han presentado diversos casos en

los que se pretende mejorar la interacción y respuesta ante estímulos de niños autistas a través de la interacción con el robot NAO. Las técnicas utilizadas proponen que los niños imiten los movimientos físicos y otras acciones como gestos o expresiones que el robot realiza para conseguir estimular la interacción social entre humano-robot (HRI).

Otros robots, tanto humanoides como con forma de animal han sido utilizados como medio de interacción con personas que presentan algún tipo de enfermedad mental o física y como medio de compañía. Por ejemplo, ASIMO [18], uno de los robots humanoides más famosos, ha sido utilizado como guía en terapias de rehabilitación física para mejorar la movilidad de articulaciones [19]. Como robot de compañía destaca NeCoro [20], un gato robótico con capacidades similares a las de un gato real capaz de mostrar emociones realizando distintos gestos y movimientos como medio de interacción.

3. Sistema hardware

El diseño y construcción de un robot social destinado a terapia y compañía debe cumplir unas especificaciones precisas que permitan al usuario una interacción cercana y agradable con el robot. Por este motivo, resulta determinante que el sistema hardware que da forma al robot quede bien estructurado y definido en diversos subsistemas tal y como muestra la Figura 2. Dichos subsistemas se detallan a continuación.

3.1. Sistema de alimentación

Como parte fundamental de todo sistema que incorpore elementos cuya fuente de energía sea la electricidad, es necesario el diseño de un sistema de alimentación robusto que permita aportar la cantidad de energía suficiente para que todos los dispositivos operen de forma satisfactoria tal y como se muestra en la Figura 2.

Dependiendo de la aplicación a la que esté destinado el robot diseñado, la forma de aportar la energía a los dispositivos será diferente. Al tratarse de un robot que debe poder transportarse y manejarse de forma sencilla, el método de alimentación del sistema más adecuado es mediante la utilización de una batería, incorporada dentro de la estructura del robot. Las baterías a utilizar deben tener el menor tamaño y peso posible, además de un coste bajo y una capacidad eléctrica elevada. En este sentido, las baterías que presentan este tipo de características son las fabricadas con Litio, en concreto baterías de Litio-Ión y Polímero de Litio debido a su alta capacidad en pequeño tamaño y peso. Quedan descartadas por tanto otras

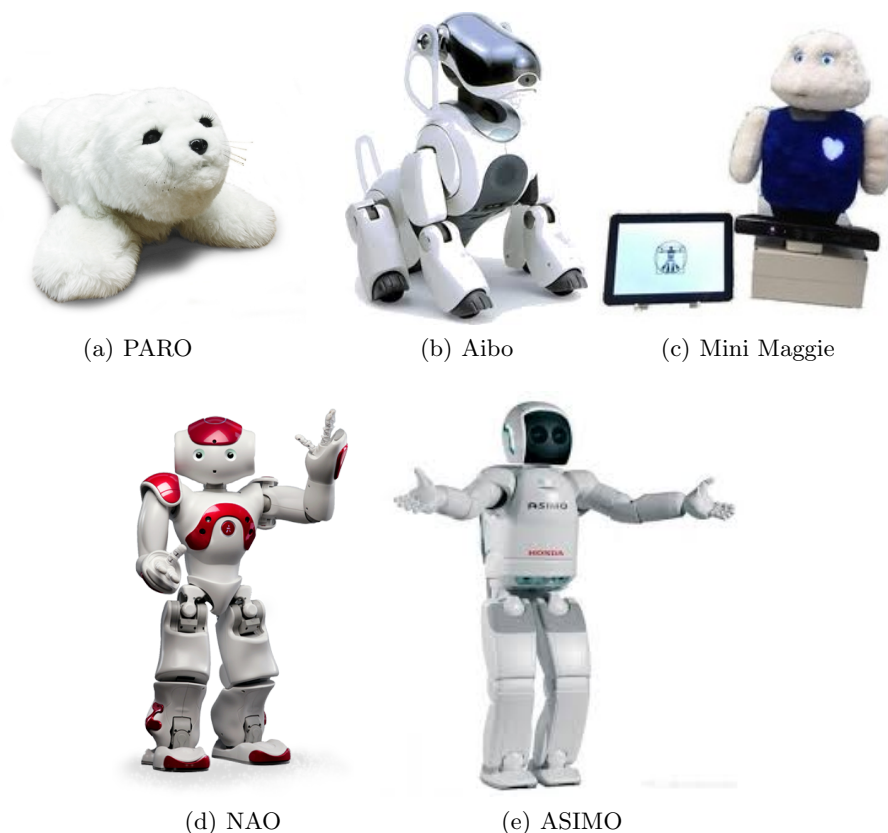


Figura 1: Algunos de los principales robots sociales destinados a aplicaciones relacionadas con la terapia y la compañía.

baterías como las fabricadas con plomo debido a su alto peso y tamaño.

Dado que la batería está incluida dentro del robot, es necesario que incorpore un sistema que permita cargarla de forma cómoda desde el exterior. Por lo tanto, será necesario, mediante un convertidor *AC/DC* adaptar la tensión aportada por la red de corriente eléctrica (corriente alterna monofásica) a los niveles de voltaje óptimos de carga de la batería (operando en corriente continua o directa). De acuerdo con la filosofía adoptada en el diseño de cualquier robot social, el sistema de carga de la batería deberá ser lo más estético posible, estando siempre acorde con la apariencia externa con la que se dote al robot.

El sistema de alimentación también debe estar correctamente dimensionado para permitir adaptar el nivel de tensión que aporte la batería a los distintos dispositivos de control, sensorización y actuación incluidos en el robot. Por este motivo, será necesario utilizar la electrónica necesaria para cumplir este requisito teniendo siempre en cuenta el consumo de corriente de cada uno de estos elementos. Comúnmente, los dispositivos electrónicos más utilizados para suministrar la energía eléctrica de la batería a los distintos elementos del robot

son los llamados convertidores *DC/DC* (convertidores de corriente directa a corriente directa).

3.2. Sistema de control

Como elemento controlador y de gestión de datos, el robot normalmente lleva incorporado un minordenador. Este ordenador se encarga de realizar todas las operaciones lógicas del sistema y gestionar la comunicación entre los distintos procesos que desarrolla el robot. Dentro de los miniordenadores de bajo coste más utilizados actualmente destaca Raspberry Pi¹. Este dispositivo permite instalar Microsoft Windows y Ubuntu entre otros sistemas operativos conocidos, aparte de tener un bajo precio y muy pequeño tamaño con una capacidad de cómputo relativamente alta. Además permite conectar un gran número de dispositivos y tarjetas de expansión con las que es compatible. Como alternativa, es posible encontrar BeagleBone Black², con características similares a Raspberry Pi, o Intel Galileo [21] y MinnowBoard³, inspirados estos dos últimos en la idea de IoT (Internet of Things, Internet de las cosas), donde cualquier dispositi-

¹<https://www.raspberrypi.org/>

²<https://beagleboard.org/>

³<https://minnowboard.org/>

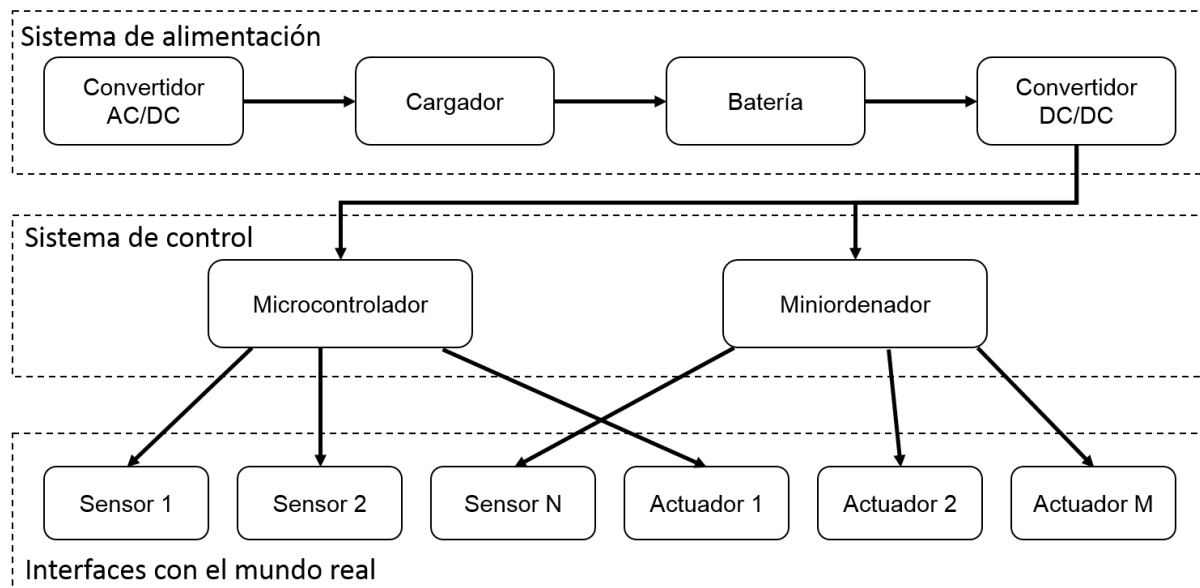


Figura 2: Relación entre los elementos hardware que debe incorporar un robot social portable de bajo coste. En la parte superior se pueden observar los elementos que componen el sistema de alimentación y las relaciones existentes entre ellos. En la parte media se encuentra tanto el miniordenador como el microcontrolador, elementos que forman parte del sistema de control del robot. Por último la parte inferior muestra los distintos sensores y actuadores, que pueden estar gestionados tanto por el miniordenador como por el microcontrolador, y que se encargan de actuar como interfaces con el mundo real.

vo estaría conectado con Internet para compartir información entre sí.

La principal función de los robots sociales es interactuar con el mundo físico que los rodea, por lo que resulta fundamental que incluyan un microcontrolador conectado al ordenador principal del robot que se encargue de gestionar los sensores y actuadores. De este modo es posible liberar de carga de trabajo al ordenador principal incluido en el robot, además de simplificar el proceso de adquisición de datos de los sensores incorporados en el robot y de aportar las señales necesarias para comandar los actuadores del mismo. En cualquier caso, se debe tener en cuenta que algunas tecnologías de sensores y actuadores pueden conectarse directamente al miniordenador (p.ej una webcam o un altavoz).

Dentro de los microcontroladores de bajo coste comerciales, destacan los pertenecientes a Arduino⁴ debido a su bajo coste y gran variedad de modelos que presentan diferentes características entre sí. Este tipo de microcontrolador resulta una buena alternativa para incorporar en un robot, reemplazando a algunos microcontroladores mucho más costosos económicamente como las tarjetas de adquisición de datos o microcontroladores más difíciles de programar y conectar como los PIC (Peripheral Interface Controller).

⁴<https://www.arduino.cc/>

3.3. Interfaces con el mundo real

Cualquier robot social debe incluir una serie de sensores que le permita obtener información del entorno. Al mismo tiempo, estos robots deben ser capaces de interactuar con el mundo físico que lo rodea mediante sus actuadores.

3.3.1. Sensores

Los principales sensores que un robot social destinado a tareas de terapia y compañía debe incluir son:

- *Tacto*: Permite captar cuando una persona interactúa con el robot tocando su superficie. En la actualidad, los más utilizados son los sensores de tacto capacitivos, colocados en zonas estratégicas del robot como la cabeza, pecho o extremidades para captar los toques del usuario en esas zonas. Como alternativa se pueden utilizar micrófonos de contacto para captar los toques del usuario mediante sonido.
- *Temperatura*: Permite conocer el ambiente en el que se encuentra el robot, tanto interna como externamente. Colocado en el interior permite saber la temperatura a la que se encuentra la electrónica del robot para limitar sus movimientos en el caso de que exista sobrecalentamiento. Colocado en el exterior del

robot permite conocer la temperatura del entorno en el que se encuentra el robot.

- *Movimiento*: Mediante la inclusión de un sensor de medición inercial (IMU, Inertial Measurement Unit), que incorpora normalmente un giróscopo, un acelerómetro y un magnetómetro, es posible conocer entre otras magnitudes la orientación del robot en el espacio o la aceleración a lo largo de los tres ejes (X, Y o Z) del robot.
- *Sonido*: En ocasiones, puede resultar interesante utilizar micrófonos para atender órdenes por parte de los usuarios que se comunican con el robot mediante el habla o sonidos no verbales.
- *Cámara*: La incorporación de una cámara en el robot permite la utilización de técnicas de procesamiento de imágenes por computador. Estas cámaras pueden proporcionar información en 2D o 3D. La cámara de visión 3D incluye una segunda lente adicional, no incluida en la cámaras estándar o de visión 2D, que permite obtener información sobre la profundidad de los objetos que capta la lente de la cámara en 2D.

3.3.2. Actuadores

Los principales actuadores a incluir en un robot social destinado a interacción son:

- *Movimiento*: La capacidad de dotar de movimiento a la estructura del robot es fundamental para dotar de expresividad a un robot social. Por ello, se coloca un motor por cada grado de libertad que se le quiera dar al robot. En aplicaciones donde el robot debe realizar movimientos de forma muy controlada, con un recorrido corto y de forma silenciosa se suele utilizar servomotores. Como alternativa, se pueden utilizar motores de corriente continua con codificador de posición para obtener la posición angular del motor o motores paso a paso, pese a que estos últimos presentan mayor dificultad en el control de su posición debido a que son menos precisos.
- *Iluminación*: La colocación de actuadores como diodos LED en la estructura externa del robot permite aportar expresividad en la interacción con el usuario. Estos actuadores normalmente se colocan en zonas específicas como mejillas, corazón o cabeza.
- *Temperatura*: La variación de la temperatura del robot se puede utilizar también, de forma regulada, para transmitir sensación de calidez

o frialdad al usuario, aportando de esta forma realismo al robot.

- *Pantallas*: Cada vez son más los robots que incorporan una pantalla LCD o una tablet para generar animaciones que representen algunos elementos de la fisiología de los animales como los ojos, boca o para mostrar emociones a través de ella.
- *Sonido*: La utilización de un altavoz incluido en el interior del robot permite la reproducción de sonidos no verbales que podrían estar inspirados en animales u otros seres animados.
- *Vibración*: Con el fin de aportar sensación de movimiento en el interior del robot, es posible incluir dispositivos de vibración que aporten esta sensación al usuario.

4. Estructura mecánica y apariencia externa de un robot social

Debido al auge que la impresión 3D ha experimentado, cada vez es más sencillo poder realizar piezas a medida a un coste relativamente bajo. Este método de prototipado rápido ha afectado también en gran medida a la robótica. Utilizando esta tecnología es posible diseñar casi cualquier estructura mecánica que de forma al robot.

La fabricación de la estructura del robot mediante impresión 3D limita el tipo de materiales a utilizar. Las impresoras 3D de bajo coste normalmente imprimen materiales de tipo plástico rígido como ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno) o PLA (Ácido poli-láctico). En los últimos meses, el número de materiales que admiten las impresoras 3D de bajo coste se encuentra en expansión, incluyendo filamentos de materiales como plástico flexible o incluso madera sintética, cerámica o cobre. En este sentido, el abanico de posibilidades que ofrece la impresión 3D permitiría construir un robot social como el que se propone diseñar en el presente trabajo. Como alternativa, sería posible realizar la estructura del robot mediante otras técnicas más clásicas utilizando materiales como aluminio o madera.

La apariencia externa del robot, depende, por lo tanto, de la estructura mecánica siendo uno de los factores fundamentales en el diseño de un robot social [22] en tanto que es uno de los factores que más influye en el usuario. Además, dentro de la aplicación a la que se destina este tipo de robots, como es la terapia y la compañía, principalmente a personas mayores que puedan presentar algún

tipo de deterioro cognitivo, resulta aún más determinante que la impresión que el usuario tenga del robot sea buena. La apariencia externa de los robots sociales ha tendido en los últimos años a adoptar formas de robots inspirados en animales, robots humanoides y robots de carácter menos realista. Todos ellos están orientados a aportar al usuario una sensación de cercanía y comodidad en base a su apariencia.

Los robots sociales utilizados en aplicaciones de terapia y compañía han tomado principalmente apariencia de animal de compañía clásico como perro (Aibo) o gato (NeCoro) a animales acuáticos como focas (PARO). La mayoría de estos animales presentan la característica común de no tener una movilidad alta, sobretodo en sus primeros meses de vida, reduciendo así la complejidad de los movimientos a realizar. Además, emiten sonidos no verbales agradables, por lo que el usuario no se sentirá intimidado ni asustado. Los animales que sirven como inspiración para este tipo de aplicaciones presentan una piel suave, adecuada para aportar calidez y tranquilidad al usuario. Por último, dada la aplicación a la que estos robots están enfocados, la inspiración en animales permite poder intentar reproducir las técnicas de rehabilitación y terapia que se utilizan con animales reales y que ha quedado demostrado científicamente que son muy beneficiosas para cierto tipo de enfermedades mentales [8].

Los robots sociales con apariencia humanoide, como NAO o ASIMO, utilizan técnicas de interacción distintas a los robots con forma de animal. Estos robots utilizan su similitud con la morfología humana para realizar movimientos más complejos. Por este motivo, los robots sociales humanoides se utilizan en sesiones de rehabilitación para personas que presentan problemas de movilidad [19] o autismo [16, 17]. En cuanto a los robots que presentan una forma menos definida, estos pueden presentar ambos tipos de interacción, ya que su estructura y apariencia puede presentar tanto características humanoides como de animales.

5. Conclusiones

Este artículo describe las características principales y elementos que puede incluir un robot social dedicado a aplicaciones relacionadas con la terapia y la compañía, así como las técnicas de diseño más utilizadas actualmente. En este artículo se detalla los diferentes sistemas que de forma general forman parte del robot, como son el sistema de alimentación, el sistema de control y los elementos que sirven como interfaces con el mundo real (sensores y actuadores). En este artículo se realiza

un análisis de los métodos actuales que permiten construir robots de pequeñas dimensiones utilizando electrónica de bajo coste e impresión 3D.

Además, se presentan los principales robots sociales utilizados actualmente en aplicaciones de terapia y compañía, como PARO o Mini Maggie. Este tipo de robots, como se ha descrito a lo largo de este artículo, están orientados a ayudar a personas mayores y niños que puedan presentar algún tipo de enfermedad mental, como alzheimer, demencia o autismo. Además, se han realizado diversos trabajos de investigación que pretenden utilizar robots como NAO o ASIMO en terapias de rehabilitación del aparato locomotor. Utilizando como ejemplos los robots presentados en la Figura 1, es posible establecer los aspectos más importantes en la estructura mecánica y la apariencia externa que debe tomar un robot social destinado a este tipo de aplicaciones como son los materiales con los que están construido, su precio, los grados de libertad que debe tener y la apariencia externa del robot.

A partir de este artículo podría resultar interesante realizar un trabajo de investigación orientado a construir prototipos de robots con distinta apariencia, principalmente de animales que resulten atractivos por su aspecto, y comprobar cual de ellos resulta más adecuado para la interacción con usuarios en función de su apariencia externa.

Agradecimientos

La investigación desarrollada ha recibido financiación de dos proyectos: “Development of social robots to help seniors with cognitive impairment” (ROBSEN), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad; y “RoboCity2030-III-CM”, financiado por la Comunidad de Madrid y cofinanciado por los Fondos Estructurales de la Unión Europea.

Referencias

- [1] C. Breazeal, “Social interactions in hri: the robot view,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 34, no. 2, pp. 181–186, 2004.
- [2] C. Breazeal, “Emotion and sociable humanoid robots,” *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 59, no. 1, pp. 119–155, 2003.
- [3] S. Schaal, “Is imitation learning the route to humanoid robots?,” *Trends in cognitive sciences*, vol. 3, no. 6, pp. 233–242, 1999.
- [4] T. Shibata, K. Inoue, and R. Irie, “Emotional robot for intelligent system-artificial emotio-

- nal creature project,” in *Robot and Human Communication, 1996., 5th IEEE International Workshop on*, pp. 466–471, IEEE, 1996.
- [5] S. Satake, T. Kanda, D. F. Glas, M. Imai, H. Ishiguro, and N. Hagita, “How to approach humans?—strategies for social robots to initiate interaction,” in *Human-Robot Interaction (HRI), 2009 4th ACM/IEEE International Conference on*, pp. 109–116, IEEE, 2009.
 - [6] R. Bemelmans, G. J. Gelderblom, P. Jonker, and L. De Witte, “Socially assistive robots in elderly care: A systematic review into effects and effectiveness,” *Journal of the American Medical Directors Association*, vol. 13, no. 2, pp. 114–120, 2012.
 - [7] T. Shibata, M. Yoshida, and J. Yamato, “Artificial emotional creature for human-machine interaction,” in *Systems, Man, and Cybernetics, 1997. Computational Cybernetics and Simulation., 1997 IEEE International Conference on*, vol. 3, pp. 2269–2274, IEEE, 1997.
 - [8] N. E. Richeson, “Effects of animal-assisted therapy on agitated behaviors and social interactions of older adults with dementia,” *American Journal of Alzheimer’s Disease & Other Dementias®*, vol. 18, no. 6, pp. 353–358, 2003.
 - [9] K. Wada and T. Shibata, “Living with seal robots—its sociopsychological and physiological influences on the elderly at a care house,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 5, pp. 972–980, 2007.
 - [10] K. Wada, T. Shibata, T. Saito, K. Sakamoto, and K. Tanie, “Psychological and social effects of one year robot assisted activity on elderly people at a health service facility for the aged,” in *Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and automation*, pp. 2785–2790, IEEE, 2005.
 - [11] M. Fujita, “On activating human communications with pet-type robot aibo,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, no. 11, pp. 1804–1813, 2004.
 - [12] M. R. Banks, L. M. Willoughby, and W. A. Banks, “Animal-assisted therapy and loneliness in nursing homes: use of robotic versus living dogs,” *Journal of the American Medical Directors Association*, vol. 9, no. 3, pp. 173–177, 2008.
 - [13] A. Kerepesi, E. Kubinyi, G. Jonsson, M. Magnusson, and A. Miklosi, “Behavioural comparison of human–animal (dog) and human–robot (aibo) interactions,” *Behavioural processes*, vol. 73, no. 1, pp. 92–99, 2006.
 - [14] M. A. Salichs, I. P. Encinar, E. Salichs, Á. Castro-González, and M. Malfaz, “Study of scenarios and technical requirements of a social assistive robot for alzheimer’s disease patients and their caregivers,” *International Journal of Social Robotics*, vol. 8, no. 1, pp. 85–102, 2016.
 - [15] D. Gouaillier, V. Hugel, P. Blazevic, C. Kilner, J. Monceaux, P. Lafourcade, B. Marnier, J. Serre, and B. Maisonnier, “Mechatronic design of nao humanoid,” in *Robotics and Automation, 2009. ICRA’09. IEEE International Conference on*, pp. 769–774, IEEE, 2009.
 - [16] S. Shamsuddin, H. Yussof, L. Ismail, F. A. Hanapiah, S. Mohamed, H. A. Piah, and N. I. Zahari, “Initial response of autistic children in human-robot interaction therapy with humanoid robot nao,” in *Signal Processing and its Applications (CSPA), 2012 IEEE 8th International Colloquium on*, pp. 188–193, IEEE, 2012.
 - [17] A. Tapus, A. Peca, A. Aly, C. Pop, L. Jisa, S. Pintea, A. S. Rusu, and D. O. David, “Children with autism social engagement in interaction with nao, an imitative robot: A series of single case experiments,” *Interaction studies*, vol. 13, no. 3, pp. 315–347, 2012.
 - [18] M. Hirose, “Development of humanoid robot asimo,” in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems (Oct. 29, 2001)*, 2001.
 - [19] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura, “The intelligent asimo: System overview and integration,” in *Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on*, vol. 3, pp. 2478–2483, IEEE, 2002.
 - [20] A. Libin, E. Libin, T. Ojika, Y. Nishimoto, T. Takeuchi, Y. Matsuda, and Y. Takahashi, “On person–robot interactions: Cat necoro communicating in two cultures (phase 1. usa–japanese study),” in *Proceedings of the 8th International Conference on Virtual Systems and Multimedia*, pp. 899–905, 2002.
 - [21] M. C. Ramon, “Intel galileo and intel galileo gen 2,” in *Intel® Galileo and Intel® Galileo Gen 2*, pp. 1–33, Springer, 2014.
 - [22] B. R. Duffy, “Anthropomorphism and the social robot,” *Robotics and autonomous systems*, vol. 42, no. 3, pp. 177–190, 2003.

Interfaces táctiles para Interacción Humano-Robot

Sara Marqués Villaroya
University Carlos III of Madrid
smarques@ing.uc3m.es

Marcos Maroto
University Carlos III of Madrid
marmarot@pa.uc3m.es

José Carlos Castillo
University Carlos III of Madrid
jocastil@ing.uc3m.es

Juan José Gamboa
University Carlos III of Madrid
jgamboa@ing.uc3m.es

Fernando Alonso-Martín
University Carlos III of Madrid
famartin@ing.uc3m.es

Miguel Ángel Salichs
University Carlos III of Madrid
salichs@ing.uc3m.es

Resumen

En la actualidad, las pantallas táctiles y tabletas han ganado protagonismo en el campo de la interacción humano-robot para robots sociales. Estos dispositivos se utilizan por ejemplo como complemento en sesiones de rehabilitación o estimulación cognitiva. Una de las ventajas que proporcionan estas interfaces es la reducción de algunos de los problemas existentes en los sistemas de comunicación por voz. Así, se proporciona un soporte gráfico en la pantalla y se aumentan las posibilidades de interacción del robot, pudiendo mostrar contenido multimedia, información variada o realizar juegos con el usuario. Para ello es fundamental el diseño de una interfaz gráfica intuitiva y que no requiera un conocimiento previo para su utilización con el fin de que usuarios sin experiencia con este tipo de dispositivos puedan interaccionar con ellos sin problemas. Este trabajo realiza un estudio sobre las aplicaciones actuales de pantallas táctiles y tabletas en robots, proporcionando una visión general de los elementos que deberían incorporar este tipo de interfaces. Además, se propone una aplicación a modo de ejemplo que incluye algunos de estos elementos.

Keywords—Robótica social, Interacción táctil, Tablet, Diseño de interfaces gráficas

1. Introducción

La investigación en Interacción Humano-Robot (HRI, por sus siglas en inglés) estudia las relaciones y comunicación entre humanos y robots. A largo plazo, el principal objetivo es permitir una interacción natural entre los seres humanos y los robots. Para conseguir una interacción natural es importante que la comunicación entre el robot y el humano sea multimodal, es decir, que emplee varios métodos de entrada o salida durante la interacción como información verbal, escrita, eventos táctiles o gestos [1]. En el campo de la robótica social, el modo de interacción más común es la voz procesada por los sistemas automáticos de reconocimiento de voz (ASR, por sus siglas en inglés) y el modo de salida más popular es el enunciado verbal del robot, normalmente generado por un sinteti-

zador de voz (TTS, por sus siglas en inglés). A pesar de que el modo de voz sea el más utilizado, suele ir acompañado de gestos, la mirada o el apoyo de una interfaz gráfica que proporcione soporte visual durante la interacción por voz [2].

Otra forma de interacción entre humanos y robots es la interacción táctil, ya sea a través de sensores de tacto tradicionales o a través de una pantalla táctil o tableta. Este tipo de interacción puede ayudar a reconocer e interpretar señales sociales estudiando los datos de duración, la presión y la velocidad con la que se haya tocado al robot o a la pantalla [3].

El trabajo que se presenta en este artículo trata de contribuir a la mejora de la interacción humano-robot, diseñando una aplicación para una pantalla táctil que permita ampliar las posibilidades de interacción del robot y ayude a solucionar los problemas de la comunicación entre la persona y el robot cuando haya problemas en la interacción por voz.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera: la sección 2 ofrece una revisión de sistemas que integran interfaces gráficas en robots. La sección 3 ofrece la propuesta de una interfaz gráfica que se podría utilizar en aplicaciones para robots sociales. La sección 4 presenta la interfaz gráfica desarrollada, la cual incluye algunas características expuestas en el apartado anterior. Por último en la sección 5 se presentan las conclusiones obtenidas tras la realización de este trabajo.

2. Robots con tabletas o pantalla

La interfaz intuitiva que nos ofrecen las tabletas, favorece la utilización de estos dispositivos en los entornos con robots. Los robots pueden mejorar la experiencia del usuario a través del funcionamiento en conjunto con aplicaciones en dispositivos inteligentes. En esta sección estudiaremos algunas aplicaciones reales de interfaces táctiles en HRI.

- *Juegos*: Popchilla (Interbots, 2011) combina una aplicación de dibujo interactivo con un robot que genera respuestas de movimiento y sonido a la entrada del usuario en la tableta. Este robot es utilizado en terapias pa-

ra niños con autismo [4]. Otros robots como RUBI cuentan con una pantalla táctil en el pecho. En esta pantalla puede mostrar juegos educativos para el desarrollo de vocabulario en los cuales se combinan elementos visuales y sonoros [5].

- *Tareas colaborativas*: Park et al. [6] presentan un conjunto de herramientas HRI que permite utilizar la pantalla de la tableta como un espacio de trabajo entre el humano y el robot. El participante enseña o aprende una nueva tarea a través de la demostración en la tableta como lo haría con otros colaboradores humanos. Para un robot es difícil reconocer las señales sociales de los humanos, la tableta disminuye la incertidumbre ya que está provista de sensores cuantitativos que proporcionan datos sobre el comportamiento gestual del usuario.
- *Comunicación*: En robótica social las pantallas táctiles se pueden utilizar como complemento al ASR en caso de que el robot no esté entendiendo al usuario con claridad [7]. También se pueden utilizar para mostrar componentes multimedia, como imágenes, vídeos o páginas web [8].
- *Localización de fuentes de sonidos*: Experiencias como Nakurama et al. [9] nos muestran como localizar fuentes de sonido en un entorno real mediante una tableta a la que se le añade una matriz de micrófonos. La ventaja en el uso de teléfonos inteligentes y tabletas es que están equipadas con una variedad cada vez mayor de sensores para ayudarnos a filtrar y organizar la gran cantidad de datos existentes en el entorno. La función principal de esta aplicación es la localización de usuarios alrededor del robot.
- *Recolección de información*: Teniendo en cuenta la inclusión de los robots en nuestro día a día podemos pensar en un robot que nos acompañe en nuestras experiencias y deje constancia de ellas. Existen robots como kiro-Pi [10] cuyo objetivo es la grabación y reproducción de momentos vividos por el usuario sin necesidad de que las fotografías o vídeos hayan sido tomados personalmente por dicho usuario, esto se traduce en una mayor interacción con el grupo. Este robot se basa en incorporar la instalación del hardware es una tableta, es decir, una tableta con brazos incorporados.

Por otro lado, existen estudios sobre las ventajas de utilizar una tableta, un robot o ambos dispositivos. Jost et al. [11] diseñaron una experiencia

para ver las diferencias durante un juego (adaptación del juego de memoria Simon) en tres escenarios diferentes: utilizando solo el robot *NAO*, usando únicamente una tableta o utilizando ambos. El primer escenario se basaba en la utilización únicamente del robot *NAO*, el cual sujetaba señales de colores para indicar el color y se las enseñaba al usuario en el orden que debía recordarlas. En el segundo escenario se usaba únicamente una tableta, la cual mostraba cuatro botones de colores que se iluminaban y el usuario debía repetir la secuencia pulsando en la pantalla. Por último, en el tercer escenario se utilizaban tanto el robot *Nao* como la tableta, en este caso la pantalla mostraba 4 botones de colores, igual que en el caso anterior, pero era el robot quien presionaba la tableta siguiendo las órdenes por voz del usuario. En las conclusiones se observa que a pesar de que la atención en el ejercicio es menor en el caso de utilizar tanto el robot como la tableta, en esta situación se produce una mayor interacción visual y verbal con el robot.

3. Propuesta

Uno de los campos donde se puede aplicar el desarrollo de interfaces gráficas para la interacción humano-robot es en las terapias con personas de la tercera edad. Según el estudio realizado por Chantal Kerssens et al. [12], una herramienta como una interfaz gráfica puede ayudar a manejar los síntomas y las necesidades comunes en la vida cotidiana de los ancianos. Además, estas tecnologías se pueden instalar en el hogar ayudando a los cuidadores a lidiar con las necesidades de las personas a su cuidado.

3.1. Módulos software

La aplicación que se propone en este trabajo debe servir tanto para pantallas táctiles genéricas (p. ej. Bellbot [13]), como para robots con una tableta como (p. ej. Pepper [14]), por lo que se deberá desarrollar de forma genérica pudiendo ser utilizada en escritorio y en un dispositivo inteligente.

Muchas plataformas robóticas actuales utilizan ROS [15], por lo que el primer componente del sistema que controla la tableta implementará la comunicación con el robot (ver parte superior de la figura 1). ROS es una arquitectura de software específicamente desarrollada para uso con robots que ofrece procesos modulares, mecanismos de comunicación muchos-a-muchos y muchos-a-uno y gran estabilidad. Los procesos de ROS se llaman nodos. Éstos son independientes y se ejecutan en paralelo. Pueden intercambiar datos a través de tópicos (canales de datos identificados únicamente

te por su nombre) y además las funciones de un nodo dado pueden ser llamadas desde otros nodos usando un servicio, únicamente definido por un nombre o por un mensaje (estructura de datos estrictamente mecanografiada). Por lo tanto, un nodo interesado en un cierto tipo de dato se suscribirá al tópico apropiado. Pueden haber varios editores (*publishers* en inglés) y suscriptores (*subscribers* en inglés) simultáneos para un solo tópico y un solo nodo puede publicar y/o suscribirse a varios tópicos.

El segundo componente del sistema que controla la tableta implementará la comunicación con la interfaz gráfica, actualizando lo que se muestra en la tableta en cada momento (ver parte central de la figura 1). Una gran parte de las interfaces gráficas utilizan QML¹, ya que permite describir qué componentes las forman y cómo estos interactúan entre sí. Por tanto, el puente entre la comunicación con el robot y la gestión de la interfaz se realizará utilizando este lenguaje.

Otro punto a favor de la utilización de la programación en QML es que permite la conexión entre los componentes de la interfaz gráfica y las propiedades que se ven modificadas por los parámetros de ROS, lo cual permite que dichos componentes se puedan crear de forma dinámica y por tanto, se pueda reducir la memoria utilizada para la aplicación.

3.2. Componentes de la interfaz de usuario

En líneas generales, es posible definir el tipo de contenido que una aplicación desarrollada para una pantalla táctil debe ser capaz de mostrar. En este caso, se proponen los componentes que mejor se ajustan a la aplicación propuesta: ejercicios de terapia con ancianos.

En primer lugar, es necesario mostrar contenido textual que permitirá mostrar recordatorios y explicaciones de las actividades que se van a realizar. También se dispondrá de la posibilidad de mostrar información visual y auditiva sobre cómo realizar una tarea básica a través de vídeos o recordatorios de eventos importantes a través de imágenes y audios de seres queridos. Otra característica de la que se deberá disponer será la de mostrar información web en la pantalla (noticias, previsión meteorológica...). Por último, es necesario tener algún tipo de pantallas que permitan la interacción directa entre la interfaz y el usuario, para ello se utilizarán pantallas de menús con botones. Este último tipo se utilizará principalmente

te en las sesiones de estimulación cognitiva y en aquellos momentos en los que la interacción por voz humano-robot tenga dificultades.

3.3. Pantallas a partir de los componentes

Una de las funcionalidades que pueden tener este tipo de interfaces es su utilización de sesiones de rehabilitación y estimulación cognitiva. Teniendo este factor en cuenta se han estudiado el tipo de pantallas con las que se cuentan en diferentes hospitales en los que se utilizan ordenadores para este tipo de sesiones.

Uno de los factores a valorar es que en este tipo de sesiones el nivel de dificultad se adapta al usuario y por tanto, se deberán desarrollar desde pantallas sencillas en las cuales únicamente se muestre un texto o una imagen hasta pantallas complejas en las que los objetos se desplazarán por ella en forma de animación para que se pulse sobre ellos.

Algunos de los ejemplos que sería interesante desarrollar serían:

- *Pantallas donde se escoge una opción:* en este tipo de pantallas se mostrará una pregunta en la parte superior y el usuario deberá responder entre las opciones del menú central.
- *Pantallas donde se relacionan conceptos:* en este tipo de pantallas el usuario deberá relacionar un concepto con algún tipo de estímulo visual (texto, imágenes) para realizar correctamente el ejercicio.

4. Ejemplo práctico

En la actualidad se ha desarrollado una aplicación que permite realizar en gran medida, todas las capacidades explicadas en el apartado anterior. Esta aplicación se ha desarrollado para que pueda ser utilizada tanto en una pantalla de ordenador como en un dispositivo Android (smartphone o Tablet). Para el desarrollo de la aplicación se ha utilizado el entorno y librerías de *Qt*², ya que permite la programación en QML y en C++. Estos dos lenguajes de programación permiten realizar tanto la comunicación entre el robot y la tableta como el desarrollo de la interfaz gráfica.

Las plataformas para las que se ha desarrollado la aplicación son: por un lado el robot *Maggie* [16], que cuenta con una pantalla táctil instalada en el pecho; el robot *Mbot* [17], equipado nuevamente con una pantalla táctil; y finalmente el robot *Mini* [18], donde el interfaz táctil es una tableta de 10" con sistema operativo Android (ver figura 2).

¹Documentación de QML: <http://doc.qt.io/qt-5/qtqml-index.html>

²Sito web de Qt: <https://www.qt.io/es/>

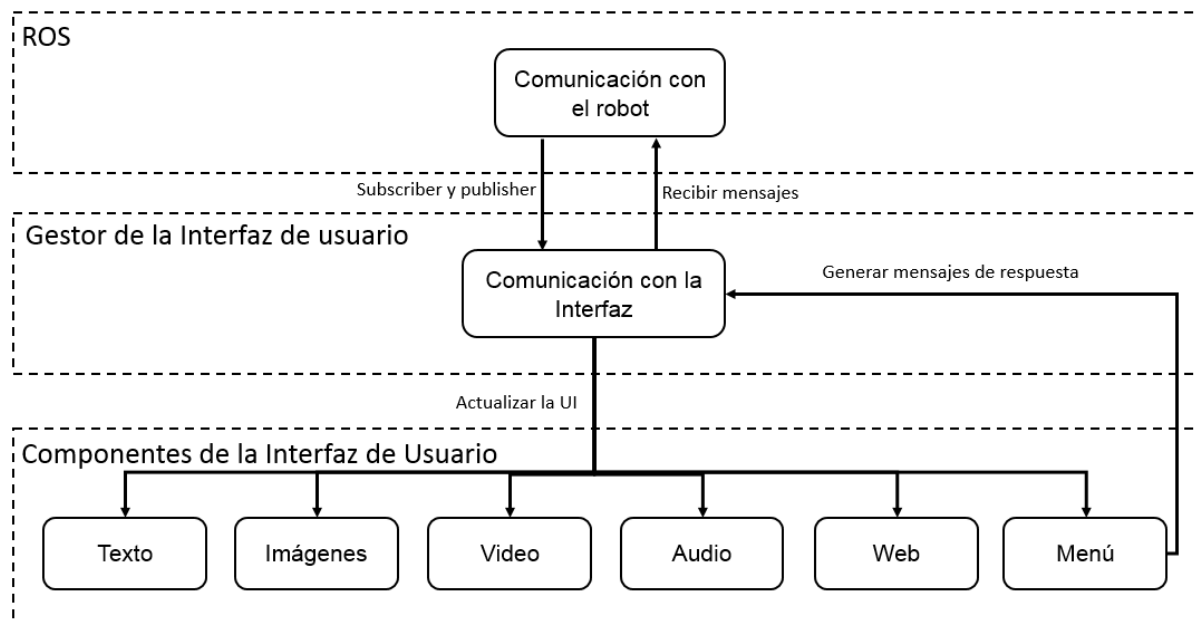


Figura 1: Relación entre las conexiones que se realizan entre un robot y una interfaz con el usuario. En la parte superior se puede observar el componente de ROS, encargado de realizar la comunicación con el robot. En la parte media se encuentra el componente encargado de realizar la función de gestor de la interfaz de usuario conectando los comandos enviados por el robot con los componentes de la interfaz. Por último la parte inferior muestran los distintos componentes que deberá contener la interfaz.

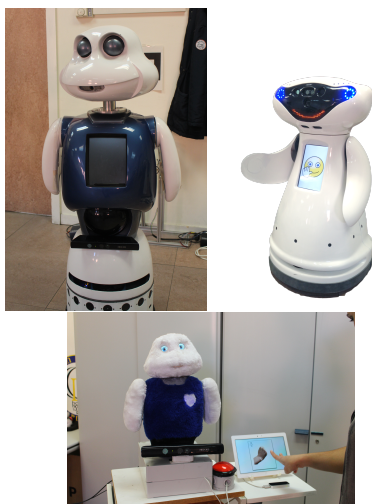


Figura 2: Plataformas para las que se ha desarrollado la aplicación. Arriba, izquierda, robot Maggie. Arriba, derecha, robot Mbot. Abajo, robot Mini.

4.1. Tipos de pantallas desarrolladas

Las pantallas desarrolladas hasta el momento son por un lado las pantallas para poder mostrar contenido multimedia, en ellas se puede mostrar texto, imágenes, vídeos, audios, gifs y páginas web. Este tipo de pantallas se utilizan para el desarrollo de ejercicios de estimulación cognitiva como por ejemplo el ejercicio de las comidas, en el cual

se muestra la fotografía de una comida típica española y el usuario tiene que responder utilizando la voz en que zona de España se cocina (ver figura 3, izquierda). Por otro lado pantallas en las que se pueda mostrar un menú de botones. En estas pantallas el número de botones se puede configurar en cada caso, con un máximo de 5. Además en cada botón se puede mostrar o bien un texto o bien una imagen, dependiendo del tipo de ejercicio que se quiera realizar. Este tipo de pantallas están diseñadas para realizar la función método de entrada en la interacción humano-robot, es decir, el usuario puede enviar información al robot a través de ellas. En la figura 3, centro y derecha, se muestran dos ejemplos de menús con las dos configuraciones posibles (texto e iconos).

5. Conclusiones

En este artículo se ha realizado un repaso por la manera en que se usan las pantallas táctiles y tabletas en trabajos y proyectos relevantes en el ámbito de la robótica social, haciendo especial mención en la utilización de este tipo de robots en las terapias de rehabilitación cognitiva. Se han comentado las características importantes que debería incorporar una aplicación para este tipo de aplicaciones y se ha presentado una aplicación capaz de mostrar contenido multimedia y pantallas de tipo menú, todo ello gestionado por el robot.



Figura 3: Pantallas de la aplicación para escritorio en las que se muestran dos tipos de menús. Izquierda: Pantalla de la aplicación para escritorio en la que se muestra una imagen. Centro: Menú en el que los botones son imágenes. Derecha: Menú en el que los botones se muestra texto.

La arquitectura desarrollada para el sistema permite que la pantalla táctil pueda ser utilizada como método de salida (mostrar contenido) o como modo de entrada (respuesta del usuario en los menús).

Las principales aplicaciones a las que pueden destinarse este tipo de interfaces son aquellas en las que se requiere un tipo de ejercicios concretos, en los cuales un soporte gráfico resulta beneficioso (ejercicios de memoria, de relacionar conceptos...) y aquellas en las que la interacción humano-robot por voz resulte complicada (por factores ambientales o por falta de entendimiento entre el humano y la máquina).

Por otro lado, la instalación de sistemas robot-tableta en centros de día o residencias de ancianos podrían ser útiles a la hora de realizar sesiones de rehabilitación cognitiva, ayudar a ejecutar las tareas diarias o entretener a las personas mayores en su día a día. Por este motivo es clave que el diseño de la aplicación sea lo más sencillo posible para facilitar su uso.

Finalmente, tomando como base este trabajo sería interesante realizar mejoras en la aplicación existente, dotándola de todas las funcionalidades nombradas y comprobar con usuarios la utilidad de este tipo de tecnología como apoyo en la interacción humano-robot.

Agradecimientos

La investigación desarrollada ha recibido financiación de dos proyectos: “Development of social robots to help seniors with cognitive impairment” (ROBSEN), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, y “RoboCity2030-III-CM”, financiado por la Comunidad de Madrid y cofinanciado por los Fondos Estructurales de la Unión Europea.

Referencias

- [1] M. Scheutz, P. Schermerhorn, J. Kramer, and D. Anderson, “First steps toward natural human-like hri,” *Autonomous Robots*, vol. 22, no. 4, pp. 411–423, 2007.
- [2] F. Alonso-Martín, A. Castro-González, F. J. F. d. G. Luengo, and M. Á. Salichs, “Augmented robotics dialog system for enhancing human-robot interaction,” *Sensors*, vol. 15, no. 7, pp. 15799–15829, 2015.
- [3] J. B. Van Erp and A. Toet, “Social touch in human-computer interaction,” *Frontiers in digital humanities*, vol. 2, p. 2, 2015.
- [4] H. W. Park and A. M. Howard, “Tabaccess, a wireless controller for tablet accessibility for individuals with limited upper-body mobility,” Georgia Institute of Technology, 2013.
- [5] M. Malmir, D. Forster, K. Youngstrom, L. Morrison, and J. R. Movellan, “Home alone: Social robots for digital ethnography of toddler behavior,” in *2013 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops*, pp. 762–768, Dec 2013.
- [6] H. W. Park and A. Howard, “Providing tablets as collaborative-task workspace for human-robot interaction,” in *Human-Robot Interaction (HRI), 2013 8th ACM/IEEE International Conference on*, pp. 207–208, IEEE, 2013.
- [7] J.-H. Han, M.-H. Jo, V. Jones, and J.-H. Jo, “Comparative study on the educational use of home robots for children,” *Journal of Information Processing Systems*, vol. 4, no. 4, pp. 159–168, 2008.

- [8] K. Goris, J. Saldien, B. Vanderborght, and D. Lefeber, "Probo, an intelligent huggable robot for hri studies with children," in *Human-Robot Interaction*, Intech, 2010.
- [9] K. Nakamura, L. Sinapayen, and K. Nakadai, "Interactive sound source localization using robot audition for tablet devices," in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 6137–6142, IEEE, 2015.
- [10] M. Yamamoto, S. Aoyagi, S. Fukumori, and T. Watanabe, "Kiropi: A life-log robot by installing embodied hardware on a tablet," in *Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), 2015 24th IEEE International Symposium on*, pp. 258–263, IEEE, 2015.
- [11] C. Jost, M. Grandgeorge, B. Le Pévédic, and D. Duhaut, "Robot or tablet: Users' behaviors on a memory game," in *Robot and Human Interactive Communication, 2014 RO-MAN: The 23rd IEEE International Symposium on*, pp. 1050–1055, IEEE, 2014.
- [12] C. Kerssens, R. Kumar, A. E. Adams, C. C. Knott, L. Matalenas, J. A. Sanford, and W. A. Rogers, "Personalized technology to support older adults with and without cognitive impairment living at home," *American Journal of Alzheimer's Disease & Other Dementias*, vol. 30, no. 1, pp. 85–97, 2015. PMID: 25614507.
- [13] J. López, D. Pérez, E. Zalama, and J. Gómez-García-Bermejo, "Bellbot-a hotel assistant system using mobile robots," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, no. 1, p. 40, 2013.
- [14] F. Tanaka, K. Isshiki, F. Takahashi, M. Uekusa, R. Sei, and K. Hayashi, "Pepper learns together with children: Development of an educational application," in *Humanoid Robots (Humanoids), 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on*, pp. 270–275, IEEE, 2015.
- [15] M. Quigley, K. Conley, B. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, R. Wheeler, and A. Y. Ng, "Ros: an open-source robot operating system," in *ICRA workshop on open source software*, vol. 3, p. 5, 2009.
- [16] M. A. Salichs, R. Barber, A. M. Khamis, M. Malfaz, J. F. Gorostiza, R. Pacheco, R. Rivas, A. Corrales, E. Delgado, and D. Garcia, "Maggie: A robotic platform for human-robot social interaction," in *2006 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, pp. 1–7, June 2006.
- [17] V. González-Pacheco, Á. Castro-González, M. Malfaz, and M. A. Salichs, "Human robot interaction in the monarch project," in *Proc. 13th Workshop Robocity2030*, pp. 1–8, 2015.
- [18] Á. Castro-González, J. C. Castillo, F. Alonso-Martín, O. V. Olortegui-Ortega, V. González-Pacheco, M. Malfaz, and M. A. Salichs, "The effects of an impolite vs. a polite robot playing rock-paper-scissors," in *International Conference on Social Robotics*, pp. 306–316, Springer, 2016.

HERRAMIENTAS DE ENTRENAMIENTO Y MONITORIZACIÓN PARA EL DESMINADO HUMANITARIO

Héctor Montes^{1,2}, Roemi Fernández¹, Pablo González de Santos¹, Manuel Armada¹

¹Centro de Automática y Robótica CAR (CSIC-UPM); ²Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Panamá, {hector.montes, roemi.fernandez, pablo.gonzalez, manuel.armada}@csic.es

Resumen

En este trabajo se presentan algunas herramientas para la monitorización y el entrenamiento en tareas de desminado humanitario, que han sido diseñadas e implementadas en el Grupo de Robótica de Exteriores y de Servicios del Centro de Automática y Robótica dentro del marco del proyecto Europeo del 7PM “TIRAMISU” (Toolbox Implementation for Removal of Anti-personnel Mines, Submunitions and UXO). Básicamente, se han diseñado e implementado cuatro herramientas para la monitorización, entrenamiento y localización de minas antipersonas simuladas e inertes debido a las competencias del grupo de trabajo. La primera de ellas es para la formación en el uso de detectores de metales, en donde se ha instrumentado para la monitorización en la realización de tareas específicas. La segunda, es dedicada a los e-tutores en los cuales se entrena al personal novato en los conceptos generales a gran escala del desminado humanitario y a la identificación de minas antipersonas y las primeras teorías para su desactivación. Otra herramienta diseñada e instrumentada es la lanceta de búsqueda de minas enterradas (prodder), la cual tiene dos versiones, la última de ellas inalámbrica. Finalmente, la última herramienta es doble, la cual consta de un robot hexápodo semi-autónomo y tele-operado, que porta un brazo robótico instrumentado con sensores para explorar el terreno durante la localización de minas antipersonas enterradas.

Palabras Clave: Desminado humanitario, detector de metales, e-tutores, *prodder*, robot hexápodo, brazo explorador, instrumentación, herramientas de entrenamiento.

1 INTRODUCCIÓN

Según el Centro Internacional de Desminado Humanitario de Ginebra (GICHD) (<https://www.gichd.org/>), en 2004, en 15 programas de países diferentes afectados con campos de minas antipersonas, 292 km² habían sido físicamente despejados, representando el 2.5% del área total

contaminada por minas antipersonas enterradas. Esta estadística pone de manifiesto la ineficiencia en la lucha contra las minas antipersonas, en cuanto a la limpieza de éstas de los campos infestados, los cuales siguen siendo enormes [1]. Por otro lado, desde un punto de vista focalizado, Sri Lanka anunció la intención de adherirse a la Convención sobre la Prohibición de Minas Antipersonas (APMBC), después de una guerra civil de 26 años que ha dejado 64 km² de tierra contaminada con minas, considerando que en 2020 el país estará libre de minas [2]. Esto indica que queda mucho por hacer en cuanto a estrategia y al uso de la tecnología en todos los sectores, ya que el proceso de desminado desde el mapeo de la tierra en busca de áreas sospechosas hasta el proceso de retirada de la mina es bastante largo.

Las situaciones en cada país son diferentes debido a las fuentes del conflicto, a las características climatológicas del mismo, al tipo de armamento utilizado, etc., por lo tanto, es complicado proporcionar soluciones estándares para todos los tipos de situaciones. En este caso particular, dentro del marco del proyecto TIRAMISU (<http://www.fp7-tiramisu.eu/>) se han proporcionado ciertas herramientas y estudios de importancia para la acción en contra de las minas antipersonas.

En general, el proyecto TIRAMISU se dividió en diez módulos diferentes con la finalidad de abordar los objetivos propuestos en su plan de trabajo. No obstante, las herramientas de entrenamiento y de monitorización diseñadas y elaboradas por el Grupo de Robótica de Exteriores y de Servicios del CAR-CSIC-UPM, fueron desarrolladas en el módulo de “Detección cercana con base en el terreno” y en el de “Entrenamiento de usuarios finales, Centro de Acción Contra las Minas (MAC), Comunidad de I+D y personal clave”.

Este escrito ha sido dividido en seis secciones, en la primera de ella se presenta, de manera muy breve, una introducción del trabajo presentado, considerando alguna información desarrollada por los estudios del GICHD, centro internacional de mayor importancia en la acción contra las minas, y el título de los módulos del proyecto TIRAMISU en donde se

desarrollaron las herramientas descritas en este trabajo. En la sección 2 se presenta una herramienta de entrenamiento en el uso con detectores de metales, la cual fue instrumentada con unidades de medida inercial. Los tutores electrónicos con base a Adobe eLearning Suite se presentan en la sección 3, los cuales fueron validados por expertos en el área. En la sección 4 se describe la herramienta “*prodger*” que es una lanceta utilizada para detectar las minas que están enterradas, luego de haber sido localizadas por el detector de metales. El sistema robótico semi-autónomo y tele-operado se describe, brevemente, en la sección 5, el cual consta de un robot hexápodo y un brazo de exploración. Finalmente, en la sección 6, se presentan algunas conclusiones.

2 HERRAMIENTA DE ENTRENAMIENTO EN EL USO DE DETECTOR DE METALES

La primera herramienta diseñada e implementada dentro del marco del proyecto TIRAMISU, por parte del Grupo de Robótica de Exteriores y de Servicio, fue la herramienta para monitorizar el uso de detectores de metales portátiles, con la finalidad de registrar el entrenamiento por parte de los aprendices en trabajos de localización de minas enterradas.

Esta herramienta de formación consta de dos partes principales, la primera de ellas es un sistema de seguimiento sensorial instalado en el detector de metales portátil, y la segunda es una interfaz gráfica de usuario (GUI), en donde se monitoriza y se registra la actividad de cada aprendiz en el uso de esta herramienta [3-4].

Para el diseño de esta herramienta se realizó un estudio de las variables que se deben tener en cuenta para la realización de búsqueda de minas antipersonas enterradas utilizando un detector de metales y con la entrevistas de expertos que formaban parte del consorcio de TIRAMISU. De esta manera, se seleccionaron las siguientes variables, consideradas de rendimiento crítico del instrumento: (i) la velocidad de escaneo, (ii) la distancia entre la cabeza del sensor del detector de metales y el suelo, (iii) la inclinación de la cabeza del sensor, (iv) paso de avance, (v) tiempo de ejecución. Estas variables forman una base de datos que es una parte importante de la herramienta de capacitación mencionada, y además para evaluar el desempeño de los alumnos.

En la Figura 1 se presenta un detector de metales compacto VMC1 de la marca Vallon [5], el cual está instrumentado con una IMU y un seguidor de movimiento que tiene GPS incorporado, y un operador que tiene en sus pies dos IMUs con la finalidad de cuantificar el desplazamiento

longitudinal de él cuando se realiza la tarea de escanear el terreno con el detector de metales.

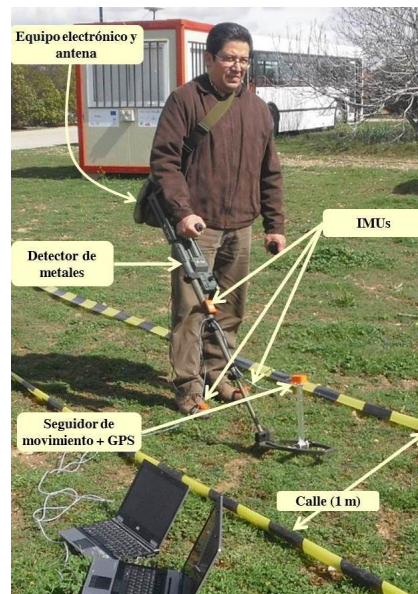


Figura 1. Aprendiz con la herramienta de entrenamiento para detectar minas antipersonas.

En la Figura 2 se presenta la interfaz gráfica de usuario (GUI) realizada en Matlab®, la cual monitoriza las tareas llevadas a cabo por el aprendiz según las variables descritas anteriormente. Esta GUI se divide en seis partes principales, las cuales son: (i) tipo de sesión, (ii) inicialización, (iii) bloque de control del proceso, (iv) ventana de monitorización del barrido, (v) monitorización de la velocidad, altura e inclinación del sensor, y (vi) bloque de exportación de los datos registrados.

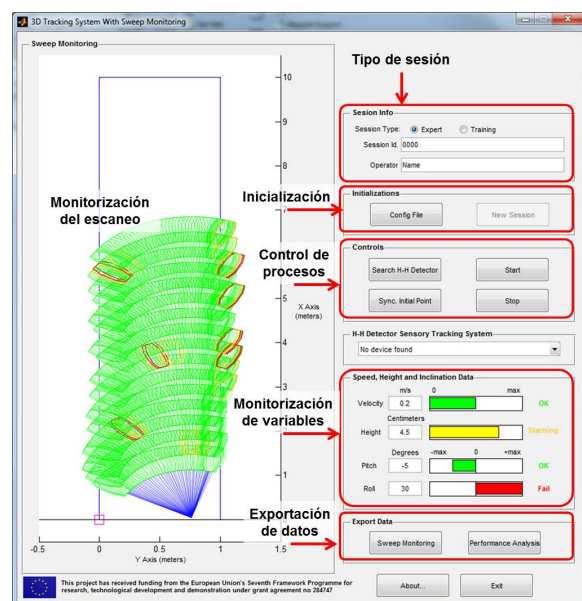


Figura 2. GUI para monitorizar las prácticas de uso del detector de metales.

3 HERRAMIENTA DE FORMACIÓN BASADA EN e-TUTORES

Desde la última década y, más aún, en el último lustro, los procesos de enseñanza, formación o entrenamiento también hacen uso de la Tecnología de la Información y la Comunicación (TIC) para proporcionar el aprendizaje en una gran gama de temas y de centros de estudios [6-7]. Este tipo de educación está dentro del concepto de *e-learning*, que no trata solamente de tomar un curso y colocarlo en un ordenador, se trata de una combinación de recursos, interactividad, apoyo y actividades de aprendizaje estructuradas. Para realizar todo este proceso es necesario conocer las posibilidades y limitaciones que el soporte informático o plataforma virtual ofrece [8]. En consecuencia, se diseñó e implementó una herramienta, basada en e-tutores (concepto dentro del *e-learning*), con la finalidad de enseñar conceptos importantes en el reconocimiento de minas antipersonas, su ensamblaje, su desarme y neutralización, así como otros conceptos de estudios generales y no-técnicos para la localización de áreas sospechosas de minas antipersonas.

El primer e-tutor diseñado en el CAR y validado por grupos de expertos del proyecto TIRAMISU se titula "Estudio General Avanzado y Estudio No-Técnica", el cual está compuesto por varias secciones con la finalidad de instruir al aprendiz en los Centros de Acción Contra las Minas, en las primeras tareas relacionadas con todo el largo proceso de desminado humanitario. En la Figura 3 se presenta la página principal de este e-tutor desarrollado sobre *Adobe e-Learning Suite*.



Figura 3. Portada del e-tutor "Advanced General and Non-Technical Survey".

Este e-tutor está compuesto por ocho lecciones independientes adecuadas para el aprendizaje asincrónico de cada estudiante. Cada lección es una secuencia de pantallas que incluyen texto, gráficos, videos e interactividad en forma de preguntas y

comentarios. En cada lección se pretende alcanzar los objetivos de aprendizaje propuestos, utilizando instrucciones interactivas, paso a paso, y ejercicios que ayudan a reforzar lo que se pretende enseñar.

El segundo e-tutor ha sido desarrollado para ser utilizado en los MAC de los países que lo necesitan. La idea es proporcionar una formación inicial a las personas civiles que necesitan aprender acerca de la identificación de las minas terrestres antipersonas, y que requieren prepararse para trabajar en esta actividad [9]. Como es conocido, la formación por parte de los estudiantes y coordinada por los MAC, se puede realizar en cualquier momento y en cualquier lugar, ya que la base de la información es a través del aprendizaje electrónico. Este tutor electrónico se compone de sub-e-tutores, los cuales son: (i) Descripción general de las minas antipersonas, (ii) Descripción de los métodos comunes de remoción de minas, (iii) Descripción de la mina PMA-1, (iv) Descripción de la mina Valmara 69, (v) Descripción de la mina VS-50, y (vi) Descripción de la mina PPM-2. En la Figura 4 se presenta la portada de dos de los sub-e-tutores.

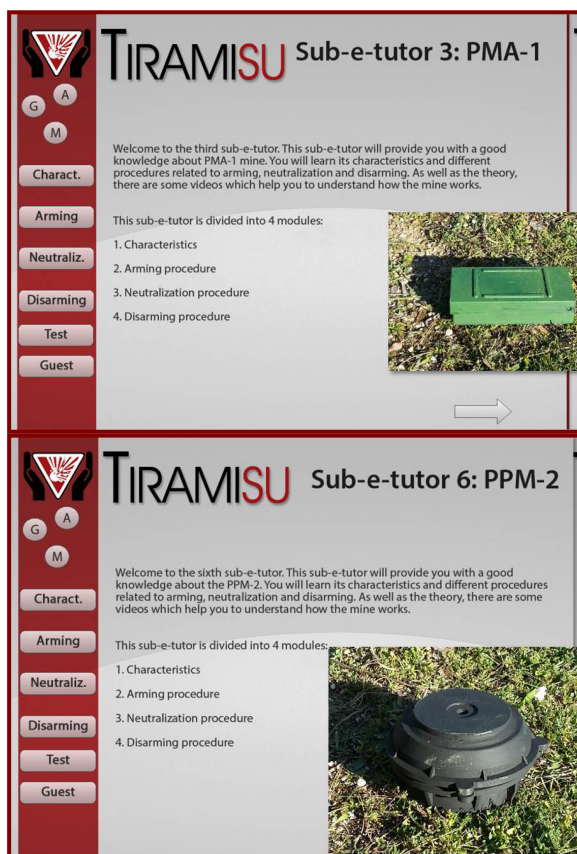


Figura 4. Portada de los sub-e-tutores 3 y 4, correspondientes al estudio de las minas PMA-1 y PPM-2, respectivamente.

4 HERRAMIENTA DE ENTRENAMIENTO PARA LA BÚSQUEDA DE MINAS ENTERRADAS

Otra herramienta que ha sido diseñada dentro del marco del proyecto TIRAMISU es la de una lanceta instrumentada para la búsqueda directa de minas antipersonas enterradas, luego de ser localizada por el detector de metales u otro medio. Este dispositivo es conocido internacionalmente con su nombre en inglés “*prodder*”, por lo tanto, es el que se utilizará de aquí en adelante. Se ha adquirido un *prodder* comercial de la casa Vallon [5], cuya parte principal es un cilindro de acero inoxidable afilado de unos 300 mm de longitud y de 8 mm de diámetro, que posteriormente, ha sido instrumentado con un sensor de fuerza y una unidad de medida inercial.

El objetivo de esta herramienta de formación es la de proporcionar datos de la fuerza ejercida por el operario cuando el *prodder* es insertado en el suelo y con qué inclinación con respecto al plano horizontal o paralelo al suelo en donde se encuentra enterrada la mina. Como es una herramienta de entrenamiento, el operario normalmente es un estudiante en fase de entrenamiento, o, previamente, un experto para obtener información útil de cómo se debe utilizar este tipo de herramienta, lo cual redundará en el aprendizaje de los novatos.

Algunas alarmas visuales (subsecuentemente, alarmas sonoras) son establecidas cuando las variables de fuerza e inclinación alcanzan ciertos límites predeterminados durante el proceso de entrenamiento. Estos límites son dependientes del tipo de mina que se está localizando y del tipo de terreno. En [10] se describe el diseño e implementación del primer prototipo de este instrumento de capacitación, además de algunos resultados experimentales.



Figura 5. Vista del *prodder* instrumentado con la electrónica de soporte.

En la Figura 5 se presenta el primer prototipo de esta herramienta diseñada por el Grupo de Robótica de Exteriores y de Servicios. La IMU es utilizada para medir los ángulos de cabeceo, alabeo y guiñada durante el ejercicio de inserción del *prodder* en el suelo, al mismo tiempo que se mide la fuerza de inserción/presión de este dispositivo a lo largo de su eje.

Una segunda versión de esta herramienta puede ser revisada en [11], cuya modificación y mejora está relacionado con la portabilidad, esto es, que no depende de un ordenador cerca para poder transferir los datos desde la electrónica de soporte, que sí debe ser realizada en el prototipo mostrado en la Figura 5. La nueva herramienta es completamente inalámbrica y envía los datos a un sistema de adquisición de datos que está cerca del ordenador en la estación base. Se tiene una ventaja, que es que el supervisor de la clase podría observar a varios aprendices realizando sus entrenamientos en diferentes lugares del campo de trabajo sin que ninguna conectividad cableada pueda interferir entre ellos y con un solo ordenador, el del supervisor. La interfaz gráfica de usuario sería la misma para ambos prototipos y es mostrada en la Figura 6.

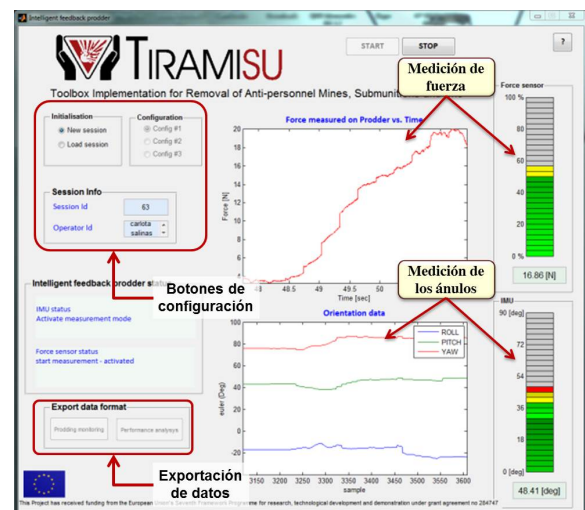


Figura 6. Interfaz para monitorizar las prácticas de los estudiantes con el uso del *prodder*.

5 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ROBÓTICO PARA LA BÚSQUEDA Y DETECCIÓN DE MINAS ANTIPERSONAS

El sistema robótico para la búsqueda y detección de minas antipersonas diseñado, desarrollado y modificado por el Grupo de Robótica de Exteriores y de Servicios consiste de un robot caminante de seis patas y de un brazo de exploración de cinco grados

de libertad, el cual porta en su extremo un detector de metales. Se ha utilizado, para este sistema-herramienta, un robot con patas debido a que es un sistema prometedor para la búsqueda de minas antipersonas en comparación con robots con ruedas, porque puede sortear los obstáculos una vez encontrados (posibles minas en su paso) y seguir con la búsqueda. Existen algunos prototipos de robots con patas que han sido probados experimentalmente, los cuales pueden ser vistos en [12-16].

El robot hexápodo diseñado en el CAR tiene una arquitectura de control que consiste en un ordenador a bordo, tarjetas de control, tarjetas de potencia, sistema de adquisición de datos, tarjetas de acondicionamiento de señal, sensores de posicionamiento, motores de CC, Wi-Fi, DGPS, y otros dispositivos y accesorios. Los algoritmos diseñados han sido desarrollados en C/C++ y ejecutados en tiempo real por el sistema operativo QNX. Con ello se han realizado varias estrategias de control para llevar a cabo tareas de modos de caminar en paralelo con las actividades de escaneo del brazo de exploración para la búsqueda y localización de minas antipersonas, considerando las variables señaladas en la sección 2 [17].

El objetivo es que el robot realice trayectorias estables con el fin de que el brazo de exploración pueda realizar movimientos adecuados de su efector final, donde está montado el cabeza del detector de metales. Para este fin, el robot hexápodo ejecuta pasos pre-establecidos hacia una posición fija de su centro de masa, para que el brazo manipulador realice la exploración del suelo. En la Figura 7 se muestra el robot hexápodo con el brazo de exploración instalado en la parte frontal de su cuerpo.

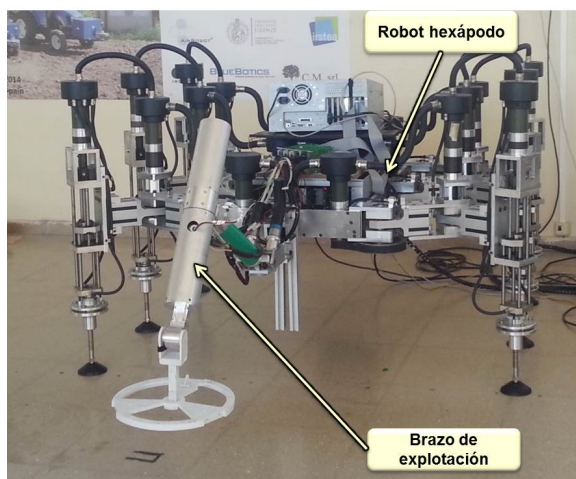


Figura 7. Sistema robótico para búsqueda de minas antipersonas, compuesto por un robot hexápodo y un brazo de exploración.

El brazo manipulador de exploración lleva instalado dos tipos de sensores diferentes, una mini cámara de tiempo de vuelo (ToF) y un sistema multisensorial VRMagic. La primera cámara tiene una resolución de 120 x 160 píxeles utilizada para obtener un mapa de profundidad, una imagen de amplitud y una nube de puntos que contienen las coordenadas cartesianas del objetivo que se está explorando.

La segunda cámara está equipada con dos sensores CMOS síncronos, que adquieren imágenes RGB con una resolución de 754 x 480 píxeles, cada uno. La fusión sensorial entre los datos de la mini-ToF con las imágenes RGB proporciona la información necesaria para conocer el área de exploración que realiza el brazo manipulador. La Figura 8 muestra algunas imágenes/datos obtenidos por el sistema sensorial instalado en el brazo manipulador.

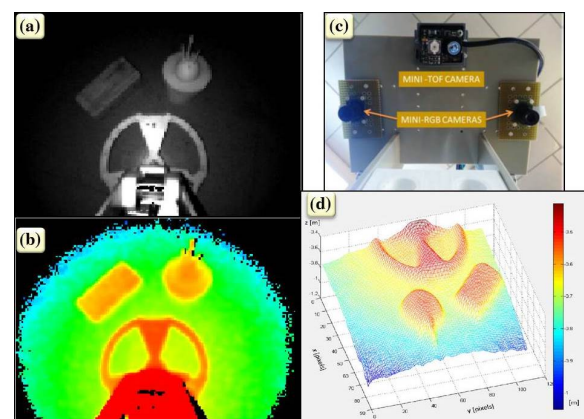


Figura 8. Sistema sensorial instalado en el brazo de exploración. (a) Imagen de amplitud de la mini ToF, (b) datos de rango de profundidad de la mini ToF, (c) sistema sensorial compuesto por una mini-ToF y dos sensores mini-RGB, (d) mapeo del área escaneada.

6 CONCLUSIÓN

Este artículo ha presentado un resumen de las tareas principales que han sido desarrolladas dentro del marco del proyecto TIRAMISU, por parte del Grupo de Robótica de Exteriores y de Servicios del CAR CSIC-UPM, con la finalidad de presentar al lector una información de interés actual, la cual puede ampliar leyendo las referencias citadas y consultado a los autores de este trabajo. Los trabajos realizados se han centrado en el diseño, implementación y validación de varias herramientas que han sido propuestas para ser utilizadas en las fases requeridas del desminado humanitario. Las herramientas desarrolladas poseen un nivel de TRL del 5 y 6, lo cual ha estado muy bien dentro de los requerimientos del proyecto.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto TIRAMISU con Convenio de Subvención N° 284747 del 7PM de la UE, y parcialmente financiado por el proyecto RoboCity2030-III-CM (Robótica aplicada a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos Fase III, S2013 / MIT-2748), financiado por Programas de Actividades I+D de la Comunidad de Madrid y cofinanciado por los Fondos Estructurales de la UE; y por el proyecto del CSIC Robótica y Sensores para los Retos Sociales (ROBSEN) (PIE 20165E050).

Referencias

- [1] GICHD, (2009) *Annual Report 2009*. Geneva International Centre for Humanitarian Demining. Geneva, Switzerland.
- [2] GICHD, (2015) *Annual Report 2015*. Geneva International Centre for Humanitarian Demining. Geneva, Switzerland.
- [3] Fernández, R., Montes, H., Salinas, C., González de Santos, P., Armada, M., (2012) Design of a training tool for improving the use of hand-held detectors in humanitarian demining. *Industrial Robot: An International Journal*, 39(5): 450 – 463.
- [4] Fernández, R., Montes, H., Gusano, J., Sarria, J., Armada, M., (2014) Design of the Human Machine Interface for training activities with hand-held detectors. In Proc. *International Symposium "Mine Action 2014"*, 23-25 April 2014, Zadar, Croatia, pp. 115-120.
- [5] Vallon, (2012) *VMC1 Mine Detector*. Disponible en: http://www.vallon.de/pdf/VMC1_leaflet_10_2012.pdf.
- [6] Mellar, H., Kambouri, M., Logan, K., Betts, S., Nance, B. and Moriarty, V., (2007) *Effective Teaching and Learning: Using ICT*. London: NRDC.
- [7] Wu, J. P., Tsai, R. J., Chen, C. C., and Wu, Y. C., (2006) An integrative model to predict the continuance use of electronic learning systems: hints for teaching. *International Journal on E-Learning*, 5(2), 287-302.
- [8] Belloch, C., (2012) Entornos Virtuales de Aprendizaje. Obtenido de *Recursos Tecnológicos en Educación y Logopedia*: <http://www.uv.es/bellochc/pedagogia/EVA3.pdf>
- [9] Montes, H., Díaz, E., Fernández, R., Sarria, J., Armada, M., (2015) e-Tutor for training in antipersonnel landmines identification. In Proc. *12th Intl. Symposium MINE ACTION 2015*, 27-30 April, Biograd, Croatia, pp 189-192.
- [10] Fernández, R., Montes, H., Gusano, J., Sarria, J., and Armada, M., (2014) Force and angle feedback prodder. In Proc. 17th Intl. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. July 21-23, Poznan, Poland. *Mobile Service Robotics*, pp. 305-312.
- [11] Montes, H., Fernández, R., De Lorenzo, D., and Armada, M., (2016) Design and implementation of a wireless prodder for instructional purposes in landmine detection. In Proc. 19th Intl. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. Sept. 12-14, London, UK. *Advances in Cooperative Robotics*: pp. 348-355.
- [12] Gonzalez de Santos, P. and Jimenez, M.A., (1995) Generation of discontinuous gaits for quadruped walking machines. *Journal of Robotics Systems*, 12(9): 599-611.
- [13] Habumuremyi, J.C., (1998) Rational designing of an electropneumatic robot for mine detection. In Proc. Of the 1st Intl. *Conference on Climbing and Walking Robots CLAWAR'98*, Brussels, Belgium, November 26-28, pp. 267-273.
- [14] Hirose, S. and Kato, K., (1998) Quadruped walking robot to perform mine detection and removal task. In Proc. of the *1st International Conference on Climbing and Walking Robots*, Brussels, Belgium, pp. 261-266.
- [15] Nonami, K., Huang, Q., Komizo, D., Fukao, Y., Asai, Y., Shiraishi, Y., Fujimoto, M., Ikeda, Y., (2003) Development and control of mine detection robot Comet-II and Comet-III. *JSME International Journal*, Series C, 46(3): 881-890.
- [16] Gonzalez de Santos P, Cobano J, Garcia E, Estremera J, Armada M., (2007) A six-legged robot-based system for humanitarian demining missions. *Mechatronics*, 17: 417-430.
- [17] Montes, H., Mena, L., Fernandez, R., Sarria, J., and Armada, M., (2015) Inspection platform for applications in humanitarian demining. In Proc. 18th Intl. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. Sept. 6-9, HangZhou, China. *Assistive Robotics*, pp. 446-453.

Control a Baja Velocidad de una Rueda con Motor de Accionamiento Directo mediante Ingeniería Basada en Modelos

Antonio J. Muñoz-Ramírez, Jesús M. Luque Bedmar, Jesús M. Gómez-de-Gabriel,
Anthony Mandow, Javier Serón, Alfonso García-Cerezo
Universidad de Málaga, Andalucía Tech, Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática
aj@uma.es

Resumen

Los motores de corriente continua sin escobillas (BLDC) con accionamiento directo suponen una solución compacta para la tracción en vehículos eléctricos, si bien requieren detectar la posición del rotor, habitualmente mediante un codificador angular de efecto Hall dentro del mismo motor. No obstante, la ausencia de reductora y a la dificultad de añadir un codificador angular de precisión suponen un reto para lograr un control preciso a baja velocidad, especialmente si se hace uso de controladoras industriales donde las posibilidades de programación son limitadas. Este trabajo propone aplicar una estrategia de ingeniería basada en modelos (MDE) para el control a baja velocidad de una rueda con motor BLDC de accionamiento directo. En particular, se presenta la solución para un caso de estudio basado en hardware de bajo coste que incluye una tarjeta Arduino Due, una controladora Roboteq HBL2360 y un interfaz de comunicación de bus CAN. La solución MDE basada en Simulink ofrece simplicidad conceptual, capacidad de adaptación a nuevas especificaciones de diseño usando herramientas de diseño avanzadas y generación de código automática. El artículo ofrece resultados experimentales obtenidos sobre el sistema real.

Palabras clave: Ingeniería basada en modelos, MDE, Simulink, control baja velocidad, motor BLDC, Bus CAN, Arduino Due

1. INTRODUCCIÓN

La ingeniería basada en modelos (MDE) permite construir sistemas mediante herramientas de modelado de alto nivel. Los lenguajes de modelado de dominio específico permiten generar código de manera automática, evitando una fase que consume tiempo, recursos y puede introducir errores [2]. Sus beneficios han sido aplicados recientemente a problemas relacionados con la automática, como el diseño de sistemas con brazos manipuladores [3], el diseño de vehículos submarinos no tripulados [7] o como herramienta en prácticas de robótica en estudios de ingeniería [6][5]. El uso de lengua-



Figura 1: El vehículo terrestre no tripulado Rambler incorpora un motor BLCD en cada rueda.

jes de modelado permite introducir el modelo del proceso a controlar como parte del diseño del controlador y ser usado para simulación y ajuste de parámetros. En trabajos anteriores hemos investigado el uso de esta estrategia para la generación automática de código de tiempo real con Simulink de placas Arduino en aplicaciones robóticas [4].

Los motores de corriente continua sin escobillas (BLDC) con accionamiento directo (*direct drive*) suponen una solución compacta para la tracción en vehículos eléctricos [11]. Estos motores requieren de un controlador electrónico para alimentar las bobinas y conseguir su rotación, lo cual se realiza en muchos casos mediante la lectura de las señales de un juego de sensores Hall que obtienen la posición del rotor.

El vehículo terrestre no tripulado Rambler (ver Figura 1) posee cuatro ruedas con motor BDLC de accionamiento directo. El control de velocidad de cada una de las ruedas se realiza mediante una controladora HBL2360 de Roboteq. Las controladoras se conectan mediante un bus CAN para la coordinación de los movimientos del vehículo. Cada rueda incorpora un codificador angular de posición de efecto Hall con una resolución de 138 cuentas por vuelta.

Con esta configuración surgen problemas de bloqueo cuando el motor no produce suficiente par

para generar el movimiento de la rueda. Esta situación se puede originar por fricciones a baja velocidad, sobre todo en el inicio del movimiento del vehículo, o a partir de accidentes del terreno. En estas situaciones de bloqueo se pueden producir acciones de control inadecuadas debido a una interpretación errónea de las lecturas de los sensores Hall. La solución de este y otros problemas prácticos hace necesaria una capacidad de diseño y ajuste del control con mayor flexibilidad que la que ofrecen los controladores comerciales.

En este sentido, resulta de interés la utilización de sistemas embebidos. En [12] se utiliza una placa microcontroladora para realizar control avanzado sobre una controladora industrial de Roboteq. Sin embargo, el modelado en Simulink tan sólo ha sido empleado para la fase de estudio y simulación del sistema.

En este artículo se aborda el control de un sistema físico que replica una de las cuatro ruedas del vehículo Rambler. Con este fin se propone una solución en la que se utilizan herramientas MDE para construir un controlador de velocidad para movimientos de precisión seguros. Para ello se utiliza un microcontrolador de tipo Arduino con una interfaz de comunicaciones CAN, que envía las referencias de par al HBL2360. Se incluye un modelo del motor, cuyos parámetros se han identificado para simulación y ajuste del controlador.

En la sección 2 se describen los componentes del sistema de control. A continuación, la sección 3 ofrece una visión global de la metodología propuesta. La sección 4 detalla el proceso de identificación de los parámetros de la planta. En la sección 5 se describe el proceso de diseño del sistema de control. Por último, se incluyen secciones dedicadas a los experimentos y las conclusiones.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

2.1. Características generales

En la Figura 2 se muestra al sistema real utilizado como caso de estudio para la solución propuesta. Este sistema constituye una réplica de uno de los cuatro sistemas rueda/motor del vehículo Rambler. El sistema está compuesto por los siguientes elementos:

- Rueda todoterreno con cubierta de tacos de 21 pulgadas de diámetro.
- Motor BLDC de accionamiento directo encastado en la llanta con codificador digital de efecto Hall.



Figura 2: Fotografía del sistema experimental, compuesto por la rueda, la controladora industrial HBL2360 y una placa Arduino Due dotada de un interfaz para comunicaciones con bus CAN.

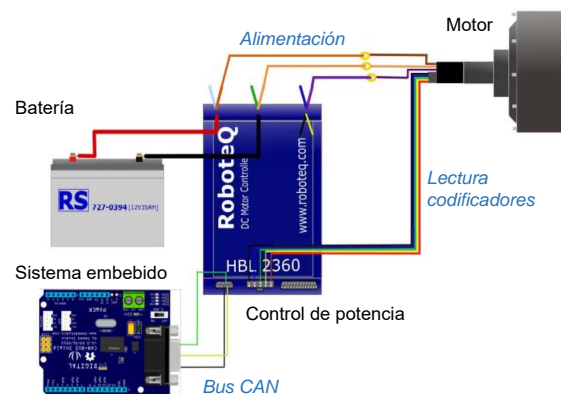


Figura 3: Esquema del conexionado del sistema de control junto con el motor.

- Controladora industrial para dos motores BLDC Roboteq HBL 2360.
- Placa microcontroladora Arduino Due.
- Interfaz de comunicaciones de Arduino para bus CAN de Seedstudio CAN Bus Shield v1.2.
- Baterías. La controladora soporta tensiones entre 12 V y 60 V.

En la Figura 3 aparece el esquema de conexionado de todos los componentes del sistema.

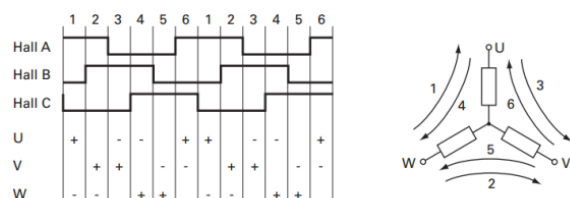


Figura 4: Activación de los sensores digitales de efecto Hall desfasados 120° para bobinas BLDC [9].

2.2. Motor BLDC de accionamiento directo

En los motores BLDC se sustituyen las escobillas responsables del cambio de polaridad por un sistema electrónico, el cual alimenta las bobinas secuencialmente para provocar el giro. Este sistema requiere detectar la posición del rotor para determinar la bobina a alimentar, para lo que se suele contar con sensores Hall.

El motor utilizado en el presente trabajo es un motor BLDC trifásico de corriente continua con 23 polos magnéticos y dos juegos independientes de sensores Hall. Cada juego consta de tres sensores Hall desfasados 120° que proporcionan una resolución de $2,6^\circ$. En la Figura 4 se ilustra la secuencia de activación de las bobinas para producir el giro junto con las señales digitales de los tres sensores Hall.

2.3. Control de Potencia

Para el control de potencia se adopta la controladora Roboteq HBL2360 para motores BLDC [8]. Este dispositivo utiliza la información de los sensores Hall para calcular la velocidad y la posición de los motores. Esta controladora acepta comandos recibidos por USB, RS232, una cadena de pulsos, interfaz CAN y entrada analógica (0 - 5V). Asimismo, dispone de dos canales para manejar dos motores. El interfaz CAN proporciona una velocidad de bus de hasta 1 Mbit/s. En particular, el protocolo MiniCAN se adecua a las exigencias de velocidad de transmisión de datos del bucle de control. La controladora se configura desde un PC a través de puertos USB y RS232 mediante una aplicación proporcionada por el fabricante.

La controladora HBL2360 permitiría implementar soluciones de control simples a través de un PID integrado. Sin embargo, en este trabajo se utilizará únicamente como control de potencia y acondicionamiento de la señal del codificador.

2.4. Sistema Embebido

El algoritmo de control de velocidad se pretende implementar en un sistema embebido consistente en una placa Arduino Due [1], basada en un microcontrolador Atmel SAM3X8E de 32 bits. Dispone de 54 pines de entradas/salidas digitales, de las cuales 12 pueden ser utilizadas como salidas de modulación por ancho de pulso (PWM). También tiene 12 entradas analógicas con resolución de 12 bits, 4 puertos serie (UART) y trabaja con un oscilador de 84 MHz. Dispone de todas sus entradas digitales con la función de interrupción.

La tensión de trabajo de la placa Arduino Due desde el punto de vista de las entradas y salidas es de 3.3 V. Cada pin puede suministrar de 3 mA – 15 mA, dependiendo del pin, o recibir de 6 mA – 9 mA, dependiendo del pin. Estos pines también poseen una resistencia de *pull-up*, que será útil para la lectura directa del codificador.

Si bien este sistema embebido posee comunicación con el bus CAN de forma nativa, la electrónica de adaptación de señales a la de la controladora es más costosa que un interfaz completo para Arduino como la CAN Bus Shield de *Seedstudio*.

3. CONTROL CON ESTRATEGIA MDE

En este trabajo se propone una estrategia MDE para el diseño del bucle de control del sistema en Simulink de tal forma que permita de forma simultánea la simulación en el PC, la programación del sistema embebido y la sintonización del controlador según las especificación de diseño deseadas. Dicho diseño se muestra en la Figura 5 en donde se aprecia la capacidad de admitir consignas de control a través del puerto serie del sistema embebido.

Para la realización de esta estrategia se proponen los siguientes pasos:

1. Implementación de un interfaz Simulink con el proceso real.
2. Identificación de un modelo lineal del proceso a partir de datos de entrada/salida.
3. Sintonización del control PID.
4. Incorporación de elementos no lineales en el control para solucionar el problema del bloque.

Todos estos aspectos se tratan en las siguientes secciones.

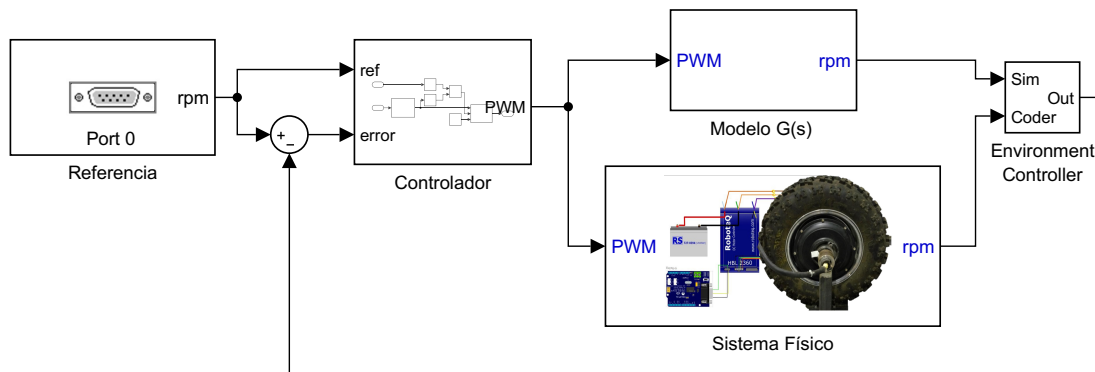


Figura 5: Implementación de la estrategia MDE mediante un modelo Simulink del sistema de control que permite la simulación, la sintonización del controlador y la generación del código para la placa Arduino.

4. IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA

En esta sección se aborda la identificación de la planta la cual consiste en la rueda, el motor BLDC, la controladora industrial HBL2360, y su sistema de actuación (PWM) y lectura de los sensores de efecto Hall dado por la tarjeta controladora Arduino Due.

4.1. Lectura de la velocidad

Como paso inicial en el estudio del sistema hay que realizar la lectura de la velocidad y el envío de la actuación PWM. La activación del motor se puede realizar con una salida PWM (modulación por anchura de pulso) a través de la entrada de RC del HBL2360. En cuanto a la medida de la velocidad, la manera más simple sería a través de las entradas digitales de la placa Arduino enlazadas con rutinas de interrupción con cada flanco, ya sea de subida o de bajada de las señales A, B, o C del codificador. Sin embargo, el resultado de la lectura directa de las señales del codificador y el cálculo de la velocidad midiendo el tiempo entre flancos [10] frente una excitación produce resultados afectados por ruido de alta frecuencia.

Alternativamente, en este trabajo se propone aprovechar el hardware de acondicionamiento de señal de la controladora HBL2360 para extraer la información de la velocidad de la rueda. Esto se puede realizar a través del interfaz bus CAN en conjunción con la excitación del motor, para lo que ha sido necesario programar dos bloques *S-Function Builder* en Simulink con la utilización de un protocolo ligero denominado MiniCAN [9]. El subsistema resultante se observa en la Figura 6.

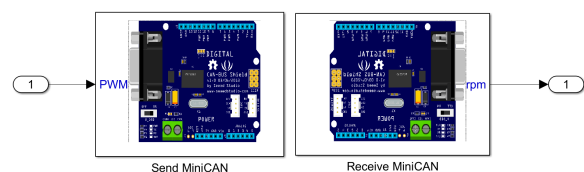


Figura 6: Definición del subsistema Simulink que permite un interfaz con el sistema físico, el cual mediante *S-Function Builder* implementa el envío de la señal PWM a la controladora HBL2360 y la lectura de la velocidad de la rueda a través del bus CAN.

4.2. Identificación del Modelo

La identificación del sistema físico se realiza mediante la herramienta *System Identification Toolbox* de Matlab. Los datos para la identificación consisten en la respuesta del sistema ante una secuencia de escalones PWM que producen una respuesta a baja velocidad (en torno a 23rpm), tal y como se muestra en la Figura 7. Empíricamente se ha comprobado que una función de transferencia dada por dos polos y ningún cero proporciona un buen ajuste (78.01 %) con los siguientes parámetros:

$$G(s) = \frac{191,065}{s^2 + 80,739s + 8,051}$$

5. CONTROL A BAJA VELOCIDAD

5.1. Modelado

En el modelo del sistema de control de la Figura 5 se observa como aparecen tanto la interconexión con el Sistema Físico a través del Bus CAN como la función de transferencia que aproxima la

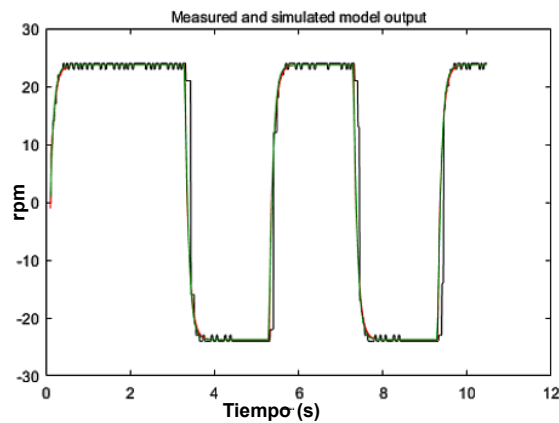


Figura 7: Comparación del señal de salida real del sistema con la del modelo identificado.

dinámica de la planta.

5.2. Sintonización

El modelo propuesto permite la sintonización con la herramienta de Matlab PID Tuner, la cual facilita el ajuste del regulador jugando con especificaciones de diseño tales como la robustez y la rapidez de la respuesta. En la Figura 8 se realiza la sintonización para unas especificaciones de respuesta del sistema de 0.5 s de tiempo de subida y 1 s de tiempo de establecimiento.

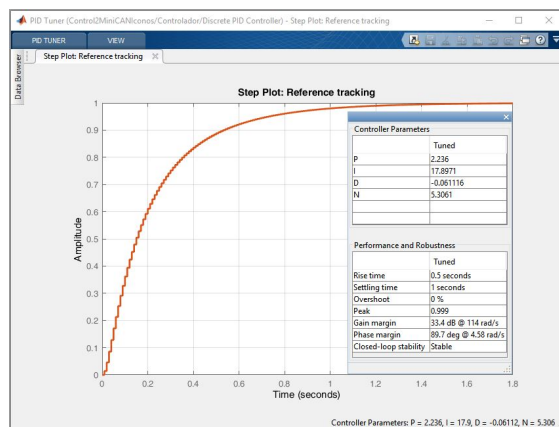


Figura 8: Ventana de la sintonización del controlador del sistema realizada con PID Tuner sobre el propio modelo, donde se obtienen los parámetros del PID en base a cumplir las especificaciones de diseño (en este caso con tiempo de subida 0.5 s y tiempo de establecimiento 1 s)

5.3. El problema del bloqueo

Mediante el modelo de la Figura 5 se permite un rápida sintonización del controlador junto con la aplicación de técnicas de filtrado derivativo, anti-windup y saturación dentro del mismo bloque del

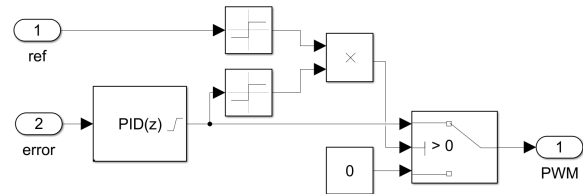


Figura 9: Modelo del controlador con bloque PID y lógica para eliminar retrocesos.

PID discreto. Otro problema que se puede abordar mediante la estrategia MDE surge en la aplicación práctica del control cuando se produce el bloqueo de la rueda.

En caso de bloqueo, se ha observado que uno de los tres sensores Hall se mantiene oscilando en su zona de flanco, lo cual es interpretado erróneamente por el controlador como una lectura de alta velocidad en el sentido de la marcha. Para compensar esta falsa lectura, la acción de control provoca súbitamente un giro a alta velocidad en sentido contrario al de la marcha.

A fin de solucionar este problema, se propone la solución que se ilustra en la Figura 9 para el subsistema de control. Esta solución permite detectar una diferencia de signo entre la referencia y el resultado del algoritmo PID, en cuyo caso se genera una actuación nula.

6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los experimentos realizados demuestran por un lado la validez de la solución propuesta y por otro la robustez frente a perturbaciones. Las pruebas se han realizado con alimentación de batería de 12 V, si bien tanto la controladora como el motor admiten hasta 60 V. De esta manera, se persigue probar el sistema de control en situaciones de bajo par.

6.1. Validación del modelo

El experimento consiste en comparar la respuesta en bucle cerrado de la planta real y del modelo identificado ante una consigna de 100 rpm. El resultado de este experimento se observa en la Figura 10, donde se aprecia bastante similitud en especial en los parámetros de diseño de tiempo de subida y tiempo de estabilización. Este resultado indica que la sintonización automática a partir del modelo identificado resulta adecuada para el control de la planta real.

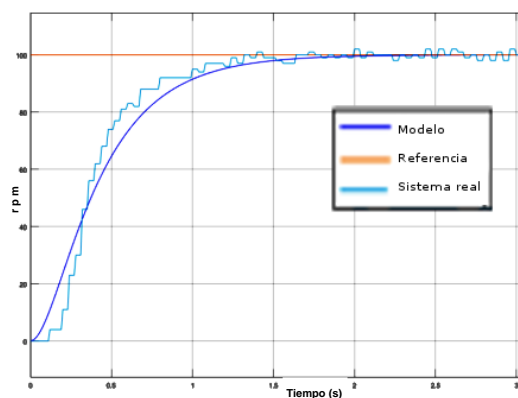


Figura 10: Comparación entre la velocidad del sistema controlado y el modelado frente una referencia de 100 rpm.

6.2. Robustez a perturbaciones

El experimento para determinar la robustez en presencia de perturbaciones se realizó aplicando una referencia continua en el tiempo y frenando manualmente la rueda con una palanca de tal forma que la fuerza ejercida sobre la rueda fuera capaz de bloquearla. Una vez puesta en marcha la rueda y estabilizada su velocidad a la de referencia (50 rpm) se frenó paulatinamente hasta el bloqueo en dos ocasiones, y posteriormente se desbloqueó también de forma pausada. Por último, se realizó una frenada suave y su consiguiente retirada también suave. La gráfica con las señales de salida obtenidas se puede visualizar en la Figura 11. Donde se aprecia que en los tres casos el controlador aumentó la actuación para mantener la referencia deseada.

7. CONCLUSIONES

En este artículo se ha abordado el control a baja velocidad de una rueda con motor de corriente continua sin escobillas (BLDC) de accionamiento directo. Concretamente, se ha ofrecido una solución para un caso de estudio consistente en la réplica de una de las cuatro ruedas del vehículo eléctrico Rambler. Con este fin, se ha propuesto una solución en la que se utilizan herramientas de ingeniería basada en modelos (MDE) a través de Simulink con generación de código automático que se ejecutará en un microcontrolador de tipo Arduino. Esta estrategia requiere identificar la dinámica de la planta para sintonizar del controlador a partir de simulaciones.

Se ha diseñado un controlador PID discreto, que evita las sobreoscilaciones y es robusto ante la presencia de perturbaciones. Asimismo, se ha incorporado al PID una solución específica para detec-

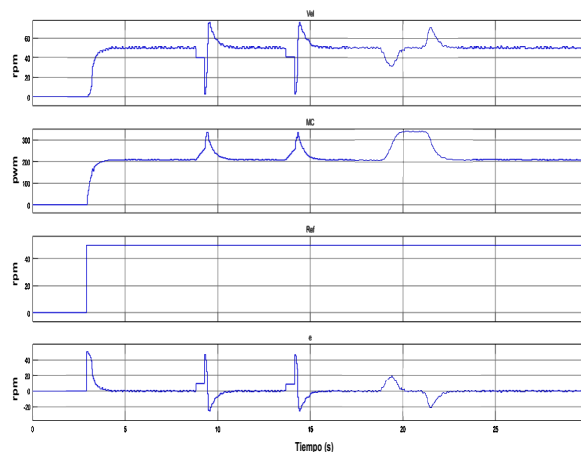


Figura 11: Resultados del sistema controlado frente una entrada en escalón al que se le han aplicado tres perturbaciones externas: dos bloqueos de la rueda para después liberarla, y una frenada y liberación suave. Las gráficas de tiempo por orden de arriba a abajo son: velocidad de la rueda en rpm, actuación en PWM, referencia en rpm, y error cometido en rpm.

tar situaciones de bloqueo de la rueda. Los resultados experimentales han mostrado un buen comportamiento del sistema controlado ante perturbaciones de bloqueo y en arranque a bajas velocidades.

La continuación de este trabajo pasa por su implantación en el vehículo robótico Rambler, en donde se aplicará la ingeniería basada en modelos en las etapas de identificación y sintonización para sus cuatro ruedas.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido parcialmente financiado por el proyecto de Innovación educativa de la Universidad de Málaga PIE 15-180 y por el proyecto CICYT DPI2015-65186-R.

Referencias

- [1] Arduino (2014). Arduino - ArduinoBoardDue.
- [2] Balasubramanian, K., Gokhale, A., Karsai, G., Sztipanovits, J., and Neema, S. (2006). Developing applications using model-driven design environments. *Computer*, 39(2):33–40.
- [3] Estévez, E., Sánchez-García, A., Gámez-García, J., Gómez-Ortega, J., and Satorres-Martínez, S. (2016). A novel model-driven approach to support development cycle of robotic systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82(1-4):737–751.
- [4] Gil Lozano, J. E., Muñoz Ramírez, A. J., Torres, V. L., and Gomez, J. M. (2014). Uso de

- Simulink y Arduino para prácticas de robótica. In *Jornadas de Automática*, pages 3–5, Valencia, Spain. Comité Español de Automática (CEA-IFAC).
- [5] Muñoz-Ramírez, A. J. and Gómez-de Gabriel, J. (2016). Modelar o programar en prácticas de robótica. In *Jornadas de Automática*, pages 1–7, Madrid. Comité Español de Automática (CEA-IFAC).
- [6] Muñoz-Ramírez, A. J., Jesús Fernández-Lozano, J., and Manuel, J. (2015). Ingeniería Basada en Modelos en Prácticas de Robótica. In *Jornadas de Automática*, pages 624–630, Bilbao. Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC).
- [7] Ortiz, F. J., Insaurralde, C. C., Alonso, D., Sánchez, F., and Petillot, Y. R. (2015). Model-driven analysis and design for software development of autonomous underwater vehicles. *Robotica*, 33(8):1731–1750.
- [8] Roboteq (2015). HBL23xx motor controller datasheet.
- [9] Roboteq (2016). RoboteQ Advanced Brushed and Brushless Digital Motor Controllers User Manual.
- [10] Romero, A., Muñoz-Ramírez, A. J., and Gómez-de Gabriel, J. (2015). Realimentación de velocidad con encoders de baja resolución en Simulink. In *Actas de las XXXVI Jornadas de Automática*, pages 215–220.
- [11] Salehifar, M., Arashloo, R. S., Moreno-Eguilaz, M., Sala, V., and Romeral, L. (2015). Observer-based open transistor fault diagnosis and fault-tolerant control of five-phase permanent magnet motor drive for application in electric vehicles. *IET Power Electronics*, 8(1):76–87.
- [12] Viguria, A., Prieto, A., Fiacchini, M., Cano, R., Rubio, F. R., Aracil, J., and Canudas-De-Wit, C. Desarrollo y experimentación de un vehículo basado en péndulo invertido (PPCar). *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 3(4):53–62.

SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS AUTÓNOMOS USANDO V-REP BAJO ROS

C. Otero, E. Paz, R. Sanz y J. López

Dep. Ing. de Sistemas y Automática, Universidad de Vigo, {omcandido, epaz, rsanz,joaquin}@uvigo.es

R. Barea, E. Romera, E. Molinos, R. Arroyo, L.M. Bergasa, E. López

Dep. Electrónica, Universidad de Alcalá, {rafael.barea, luism.bergasa,elenalopezg}@uah.es,

{eduardo.romera, eduardo.molinos, roberto.arroyo}@edu.uah.es

Resumen

En este artículo se presentan las principales características del entorno de simulación que se está utilizando para el desarrollo de diferentes algoritmos de conducción autónoma. Estos desarrollos forman parte de un proyecto de conducción autónoma de vehículo en el marco del Plan Nacional de Investigación denominado SmartElderlyCar y desarrollado por la Universidad de Alcalá (UAH) y la Universidad de Vigo (UVIGO). Se ha realizado de forma exitosa la simulación de un vehículo comercial en V-REP controlado mediante nodos desarrollados bajo el sistema ROS en el campus externo de la UAH y se ha logrado conducir por sus carriles siguiendo la línea central mediante un algoritmo de seguimiento de trayectoria.

Palabras Clave: Simulación, conducción autónoma, V-REP, ROS.

1 INTRODUCCIÓN

La conducción autónoma es indiscutiblemente una de las tecnologías que mayor auge ha tenido en los últimos años. El reto al que hay que enfrentarse es el desarrollo de un sistema que pueda ser implantado en un vehículo con el objetivo de conducirlo de manera totalmente autónoma. Es en este ámbito donde se desarrolla el proyecto de investigación de los grupos que presentan este trabajo, orientado a la investigación en tecnologías que posibiliten un sistema de conducción inteligente para personas mayores en entornos fundamentalmente urbanos. Para tal fin, estamos utilizando el sistema operativo de código abierto ROS [13], que ha ido creciendo estos años gracias a la contribución de distintos profesionales y aficionados de la robótica. ROS proporciona un sistema de comunicación entre los diferentes programas de nuestro sistema. Los trabajos de investigación sobre navegación autónoma requieren la creación de un entorno de simulación

que permita evaluar exhaustivamente los algoritmos desarrollados antes de su validación en condiciones reales. El primer paso en nuestra labor está siendo el desarrollo de un entorno simulado en el que se puedan probar nuestros algoritmos antes de implementarlos en el vehículo real.

Este artículo presenta la etapa de simulación de nuestro proyecto, explicando la justificación para la elección del entorno V-REP [15], las distintas decisiones que se han adoptado y mostrando los avances alcanzados.

El artículo está organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se explica la decisión de utilizar V-REP frente a otros simuladores similares, haciendo una breve presentación del mismo y de sus ventajas. La sección 3 detalla la etapa de simulación propiamente dicha. Se explica cómo se obtiene el mapa del entorno, cómo se diseña y controla el vehículo junto con sus sensores y se indica la manera en que se comunica con ROS. En la sección 4 se explica la arquitectura software, que hemos bautizado como *SmartCar*, que consiste de una serie de capas de distinto nivel de abstracción. Aquí se da una pincelada de cada capa, explicando con un poco más de detenimiento los distintos sistemas que intervienen en la capa de control (mapeado, planificación, percepción, etc.). La sección 5 muestra las conclusiones y recoge algunas de las líneas de desarrollo futuras en las que ya se está trabajando.

2 EL SIMULADOR V-REP Y SU INTEGRACIÓN EN ROS

Existen diferentes criterios para la elección de un simulador de vehículos [5]. Aunque generalmente prevalecen criterios técnicos, muchas veces las preferencias personales afectan a la toma de la mejor decisión. En nuestro caso, hemos considerado dos de los simuladores en 3D más empleados en el ámbito de la robótica: V-REP y Gazebo, por su facilidad de integración en el entorno ROS.

Gazebo es un simulador en 3D bastante popular entre los investigadores en robótica, por lo que se pueden encontrar muchos modelos de robots, actuadores y sensores. Es un simulador de código abierto, y tiene una interfaz con ROS nativa y, además, tiene una comunidad de usuarios grande y activa.

Por otro lado, V-REP es un simulador en 3D con un entorno de desarrollo integrado, que se basa en una arquitectura de control distribuido [11]. Esto hace que V-REP sea muy versátil e ideal para aplicaciones multi-robot. V-REP se utiliza para el desarrollo rápido de algoritmos, simulaciones de automatización de procesos de fabricación, prototipado rápido y verificación, educación relacionada con robótica, entre otros.

Para la elección del simulador nos hemos basado en el rendimiento de ambos en un entorno complejo [8]. El rendimiento de un simulador de robot y su precisión son típicamente el resultado de un balance entre el número de robots y la velocidad de la simulación. Se ha tenido en cuenta la facilidad de integración de mapas de entorno y objetos estáticos y dinámicos en el escenario.

2.1 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE V-REP

V-REP es un software de simulación multiplataforma desarrollado por Coppelia Robotics GmbH. Permite la personalización completa de la simulación mediante diferentes enfoques (complementos, plugins, scripts, etc.) y soporta cuatro motores dinámicos/físicos: Bullet, ODE, Newton y Vortex. Es posible crear modelos personalizados utilizando una amplia variedad de actuadores y sensores incorporados, articulaciones, formas y mallas, scripts, etc. [16].

V-REP está en una etapa de desarrollo avanzada y continua y tiene un foro de soporte muy activo. En cuanto a las condiciones de licencia, está disponible para investigadores y entusiastas de la robótica, una versión gratuita totalmente funcional de V-REP.

2.2 VENTAJAS POTENCIALES DE V-REP

Inicialmente se consideró la posibilidad de utilizar Gazebo, ya que soporta de forma nativa la comunicación con ROS. Sin embargo, V-REP fue finalmente elegido por su facilidad para crear nuevos modelos o modificar los ya existentes. Además, se pueden hacer pequeños cambios de programación utilizando *scripts* en LUA, dejando la carga computacional más pesada a complementos compilados escritos en C++.

V-REP es compatible con muchos formatos de objetos, lo que lo hace perfecto para cargar un entorno de simulación personalizado.

El rendimiento que se ha observado es muy similar entre V-REP y Gazebo, por lo que no ha sido un punto decisivo en la elección final de V-REP.

3 ETAPA DE SIMULACIÓN

Aunque V-REP no soporta nativamente la comunicación con nodos ROS, el *plugin RosInterface* permite esta funcionalidad, replicando de manera natural la API de la librería *roscpp*.

Tanto en simulación como con hardware real, se respetarán las convenciones para los diferentes sistemas de ejes [9][10]. Las diferentes convenciones adoptadas se irán señalando en cada uno de los siguientes apartados.

3.1 ENTORNO

El entorno en el que se probará el vehículo real es el campus externo de la UAH. Se ha modelado el entorno utilizando el servicio abierto *OpenStreetMap*. En este servicio los usuarios pueden mapear una zona y subirla a los servidores para uso público.

3.1.1 Mapa y edificios

V-REP permite importar fácilmente diversos formatos de mallas, por lo que las carreteras y los edificios se han cargado mediante archivos OBJ. Para importar los edificios se ha descargado el archivo OSM correspondiente al campus de la UAH, directamente de la web de *OpenStreetMap*. Posteriormente, este archivo se ha convertido a formato OBJ con la herramienta de código abierto *OSM2World*. Una vez importado este archivo nos quedamos únicamente con los edificios, eliminando el resto de los elementos.

A la hora de importar el archivo OBJ en V-REP, aparece un diálogo para seleccionar la escala y la orientación de la figura. La escala se escoge de tal manera que una unidad equivale a un metro y la orientación se establece con el vector Z apuntando hacia arriba. Si se examina el archivo OBJ con un editor de texto, se comprobará que las cuatro primeras líneas son una cabecera comentada que contiene esta información junto con la coordenada de origen (*origin coordinate*) del mapa local. Esta coordenada es el punto en coordenadas WGS84 (lat,lon,ele) que equivale en el simulador a la coordenada cartesiana (0,0,0).

Las carreteras se importan utilizando otro método. En la sección 4.2 se explica que los carriles se mapean mediante lanelets. Para importar los lanelets en V-REP se ha desarrollado un programa sencillo que convierte los carriles en mallas. Este software es objeto de mejora pudiendo añadir automáticamente otros elementos como señalización y marcado de la carretera en función de la riqueza del mapa de OSM.

Es importante tener en cuenta que el mapeado se realiza en coordenadas WGS84 y que el simulador trabaja en coordenadas cartesianas (UTM) relativas al punto origen anteriormente mencionado. Las transformaciones de un sistema a otro se realizan empleando las librerías implementadas en el paquete ROS *geodesy* y restando el desfase dado por la coordenada de origen del mapa, convirtiéndola previamente también a UTM.

3.1.2 Otros elementos

Para realizar pruebas de percepción con los sensores de visión, se han añadido manualmente elementos comunes encontrados habitualmente en el campus de la UAH (señales, árboles, farolas, etc.). Estos elementos han sido obtenidos de repositorios de archivos CAD libres y convertidos a formato OBJ.

3.2 VEHÍCULO

En la Figura 1 se muestra una captura del vehículo simulado tomando una rotonda. La parte visual del vehículo ha sido importada de un repositorio de CAD, dándole el aspecto de un vehículo comercial.

La parte con propiedades dinámicas está formada por *cuboids* (paralelepípedos rectos) a los que se les da una masa para simular la inercia del vehículo. Además, está dotado de cuatro ruedas con amortiguación, motor propulsor, frenos, dirección y sensores.

El sistema de referencia del coche se sitúa centrado en el eje trasero, tomando el eje X apuntando al frente, el Y a la izquierda y el Z arriba. El vehículo es controlado por comandos de velocidad (lineal en X y angular en Z). La velocidad angular en Z se toma positiva según la regla de la mano derecha, por lo que los giros a la izquierda serán positivos. Estos comandos de velocidad son interpretados por el módulo base, obteniendo el ángulo de giro correspondiente, según se esté en modo automático o manual, y enviando al volante la consigna de giro correspondiente.

3.2.1 Control de dirección

Para simular el sistema de dirección del vehículo real con aceleraciones finitas, éste se ha simulado en V-REP como un sistema dinámico (con inercia y fricción) actuado por un motor servo-controlado en posición. Esto quiere decir que la posición del volante es controlada internamente por V-REP mediante un PID. El simulador recibe consignas de posición del volante de la misma manera que el vehículo real. La posición actual del volante determina el ángulo de dirección de una rueda directriz virtual central según el modelo bicicleta [6]. Mediante una serie de relaciones matemáticas, se

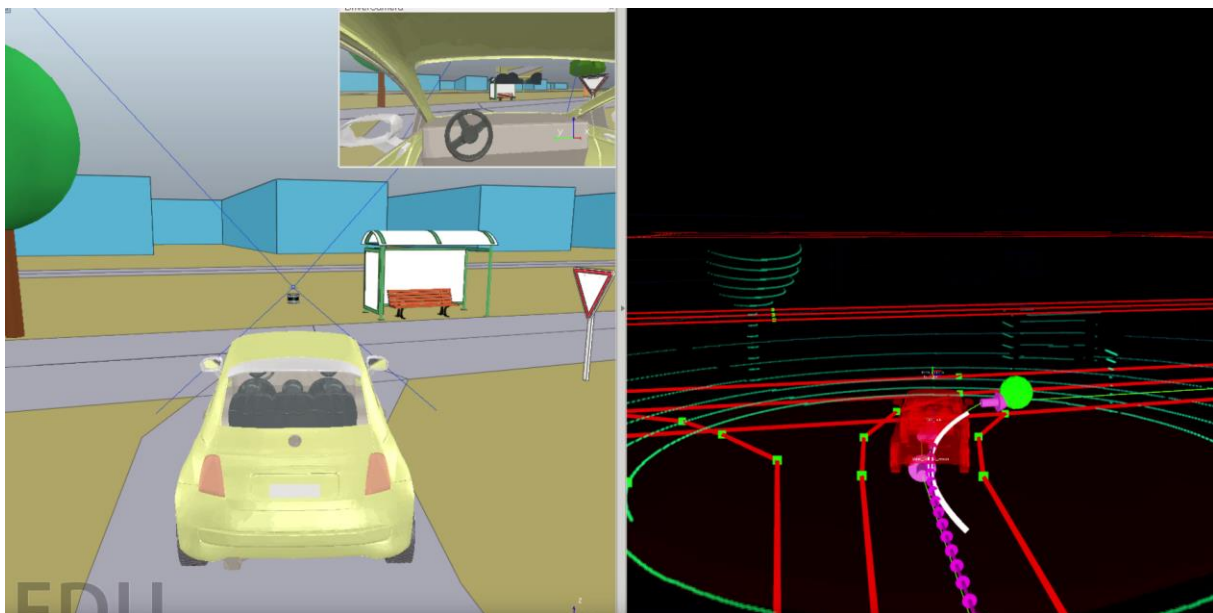


Figura 1: Ejemplo de seguimiento de la línea central de un carril utilizando el algoritmo *pure pursuit*. A la izquierda se muestra el vehículo simulado en V-REP y a la izquierda se visualizan las lecturas del LiDAR, los carriles mapeados, la curvatura instantánea (línea blanca) y el próximo punto objetivo (punto verde)

establece la orientación de las ruedas delanteras de tal manera que se cumpla la disposición Ackermann de las mismas para un centro instantáneo de rotación determinado.

3.2.2 Sensores

Los principales sensores de los que se ha dotado al vehículo son un láser LiDAR 3D, una cámara estéreo y un GPS. Se ha creado un modelo de cada uno de ellos que simula su comportamiento.

LiDAR: colocado sobre la carrocería del vehículo y en el centro del mismo. La implementación más intuitiva sería utilizar un único sensor de N haces (resolución $1 \times N$) y hacerlo girar mediante una junta de revolución. Se ha probado esta implementación y se ha visto que implica leer cientos de veces los datos de visión en cada ciclo de simulación de 50 ms, que en V-REP implica un gran coste computacional, haciendo la simulación inviable. Por tanto, se parte del modelo *velodyne VPL-16* incluido por defecto en el repositorio de sensores de V-REP. Este sensor está modelado como 4 sensores de visión equiespaciados barriendo un ángulo horizontal de 360° y uno vertical de $\pm 15^\circ$ con 16 haces diferentes, que es una forma mucho más eficiente de modelarlo.

La información del LiDAR debe ser dada en *PointCloud2*, que es el formato estándar más extendido actualmente para nubes de puntos. Debido a que crear este mensaje desde un *child script* en V-REP implicaría la creación de un gran número de tablas en LUA, lo cual es computacionalmente inviable, se ha modificado el *plugin* que trae por defecto el sensor de V-REP. Los tres cambios realizados son:

- Se publica directamente en ROS en formato *PointCloud2*.
- Se espera a que se hayan barrido 360° para publicar una vuelta completa.
- Las medidas del barrido completo (360°) se obtienen en varios pasos, cada uno referido a la posición en que se encuentra el vehículo. Como al final se transmiten todas juntas, es necesario ajustarlas para corregir el desfase debido al desplazamiento del vehículo.

Cámara estéreo: para modelar una cámara estéreo, colocada en la parte frontal del vehículo a la altura del espejo retrovisor y orientada hacia la carretera, se ha creado un modelo que consta de dos sensores de visión que leen únicamente información RGB. Ambos sensores están separados horizontalmente una distancia interocular fija d (línea base). A partir de la publicación en ROS de estas imágenes y de las matrices de calibración de los sensores, se pueden utilizar paquetes de procesamiento de imágenes que

obtienen la información de profundidad y devuelvan una nube de puntos 3D.

Adicionalmente, se utiliza un sensor de visión situado en medio de los dos sensores anteriores que devuelve directamente una nube de puntos con gran precisión. Tiene sentido incorporar este sensor en el caso de que la cámara estéreo comercial que incorpore el vehículo real ya incluya internamente un módulo de cálculo de profundidad. Dependiendo de la solución final adoptada, tendrá sentido utilizar el sensor de profundidad o los dos de visión RGB.

Los mensajes de imágenes (de tipo *sensor_msgs/Image*) deberían ser publicados con el eje X apuntando hacia la derecha, el Y hacia abajo y el Z hacia adentro en el plano de la imagen. Si se visualiza directamente en ROS una imagen tomada por un sensor de V-REP, se verá que la imagen está volteada horizontalmente. Esto puede solucionarse para las cámaras RGB utilizando filtros integrados en V-REP. Para la cámara de profundidad, ha sido necesario utilizar un *plugin* y crear una función que voltee la imagen.

La imagen de profundidad se publica con codificación 32FC1 (4 bytes) y las imágenes RGB con codificación rgb8 (3 bytes). Es importante tener esto en cuenta a la hora de cubrir los campos del mensaje que contiene la imagen [14].

3.2.3 Control mediante palanca de mando (joystick)

Para hacer algunas pruebas, es importante poder mover manualmente el coche. Para ello se ha utilizado un *joystick* y se ha creado un nodo que lee la posición de los ejes de interés (velocidad y dirección), y envía la velocidad y el ángulo deseado de giro de volante. Por simplicidad, se utiliza el campo de velocidad angular en Z del mensaje *twist_vel* para enviar el ángulo de giro del volante. En el simulador, según esté en modo automático o manual, se interpreta el campo *twist.angular.z* como velocidad angular, o como ángulo de giro de volante si está en modo manual.

Se ha utilizado con éxito un mando de PS3 y un volante USB para conducir manualmente el vehículo. Para conectar los *joysticks* con ROS, se instala el paquete *joystick_drivers*. Tras haber configurado la ruta del dispositivo, el nodo *joy_node* publica el *topic* ROS *joy* con el valor de todos los ejes y botones del dispositivo. Atendiendo al índice de los ejes de interés y de los valores límite de cada uno, se crea un nodo que lee el *topic joy* y publica un comando de velocidad. Se recomienda parametrizar los índices, los desfases y las ganancias de cada eje

para hacer el nodo compatible con distintos dispositivos.

3.2.4 Módulo base

Este módulo ha sido implementado en un *child script* de V-REP y funciona como interfaz entre el vehículo y el sistema. Principalmente, recibe los comandos de velocidad y los convierte en orientación y velocidad de rotación de las ruedas delanteras. Para ello, el módulo interpreta las órdenes de velocidad, según se esté en modo manual o automático, y obtiene el ángulo de giro objetivo del volante y la velocidad lineal deseada del coche. A continuación, lee la posición instantánea del volante. Con ese valor y la velocidad lineal deseada del coche, se calcula la orientación y la velocidad angular de cada rueda delantera según la geometría Ackermann.

Además, en la etapa de simulación, también se utilizan la velocidad del coche y su posición exacta para publicar las transformaciones de posición y orientación entre diferentes elementos.

3.3 Otras funciones

En V-REP hay que actualizar manualmente el árbol de transformaciones entre elementos (el *topic* ROS */tf*). Para ello, primero se calcula manualmente la *pose* relativa entre dos elementos y se publica usando la función *simExtRosInterface_sendTransforms* del *plugin RosInterface*. Todas las transformaciones son actualizadas constantemente. En el caso de vehículos reales, las transformaciones fijas, como las que existen entre el vehículo y los sensores, se suelen publicar utilizando las *static transforms* de ROS.

De forma similar, podemos crear un mensaje del tipo *nav_msgs/odometry*. Esto es especialmente útil en robots móviles si se quiere utilizar el paquete *navigation* de ROS, ya que es una información imprescindible para su funcionamiento. Este mensaje también es útil para leer la posición exacta y la velocidad del vehículo, pero también se puede publicar otros mensajes individuales con esta información.

A menudo, es deseable que los algoritmos de control trabajen en tiempo de simulación. V-REP no publica por defecto el tiempo de simulación, pero la solución es inmediata utilizando el *plugin RosInterface*. Dado que V-REP no asegura en qué orden se va a ejecutar cada *child script* y se quiere que el *topic /clock* se actualice antes de cada ciclo de simulación, se decide modificar el *main script* de la escena para que al inicio de cada ciclo de simulación se publique el *topic* ROS */clock* con los segundos de simulación transcurridos. Es importante poner el parámetro *use_sim_time* a *true* antes de ejecutar V-REP y

cualquier nodo que utilice el tiempo de simulación, de otro modo tomará el *wall time* de ROS.

4 ARQUITECTURA SMARTCAR

El sistema desarrollado, que hemos denominado *SmartCar*, se divide en capas, tal y como se muestra en la Figura 2. Las capas se organizan de tal manera que cada capa depende de la anterior, siendo la superior la más abstracta.

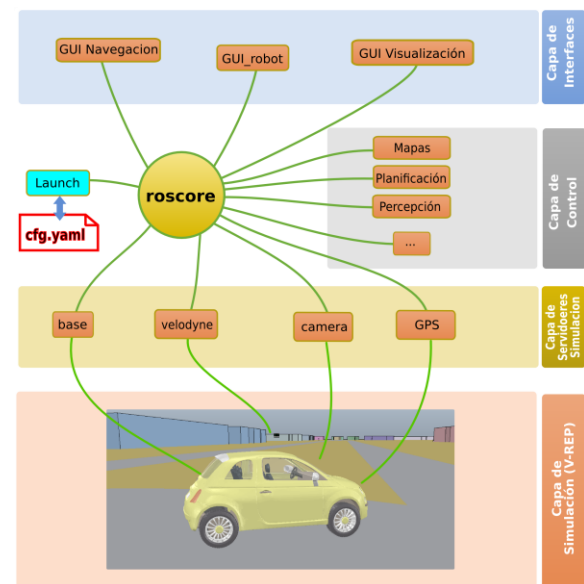


Figura 2: Estructura del sistema *SmartCar* en la etapa de simulación

4.1 CAPAS

Capa de interfaz: es la capa de nivel más alto. Incluye algunas interfaces de usuario para enviar objetivos de destino al vehículo, teleoperarlo y visualizar lecturas como nubes de puntos, posición, velocidad, etc.

Capa de control: es la capa que proporciona inteligencia al vehículo. Las funcionalidades que pertenecen a esta capa son la gestión de mapas, la gestión de comportamientos, la percepción del entorno y la planificación. Estas funcionalidades son descritas con más detalle en los restantes apartados de este artículo.

Capa de servidor hardware/simulación dependiendo del tipo de sistema, real o simulado, se utiliza el término hardware o **simulación**, respectivamente. Esta capa contiene todos los controladores que manejan la capa de hardware/simulación. Los nodos principales son *base* (lee objetivos de velocidad y publica los comandos para conducir el coche), *velodyne* (lee las medidas de láser y publica una revolución completa), *camera*

(empareja las lecturas de imagen y las publica en el formato correcto) y **GPS** (lee las medidas GPS y las publica en formato estándar).

Capa hardware/simulación: esta es la capa de nivel más bajo. Se trata del vehículo real, en el caso de la capa de hardware, o bien del modelo simulado, en el caso de la capa de simulación.

4.2 GESTIÓN DE MAPAS

Las carreteras han sido mapeadas utilizando *lanelets* [17]. Mediante la herramienta abierta JOSM, se ha accedido a un mapa satélite del campus de la UAH y se han delimitado manualmente los carriles, incluyendo información regulatoria de tráfico, como puntos de parada, intersecciones, etc.

Este mapa topológico que hemos enriquecido para poder conducir con seguridad por las carreteras, es procesado por el *map manager*, que se encarga de planificar la ruta y enviársela al planificador de trayectorias.

4.3 PERCEPCIÓN DEL ENTORNO

El organigrama de funcionamiento del sistema de percepción se muestra en la Figura 3. El sistema de percepción percibe el entorno y obtiene la información correspondiente al LiDAR 3D y la cámara.

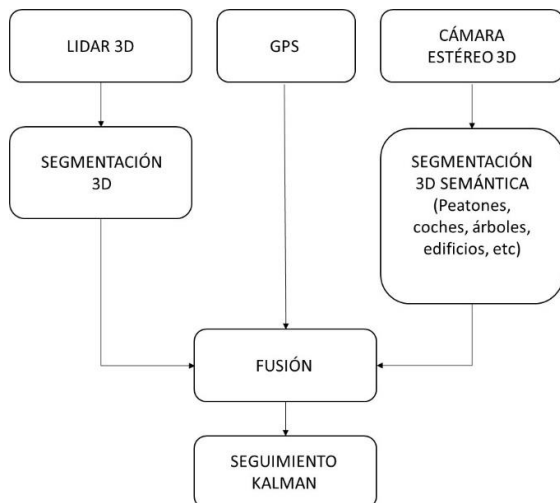


Figura 3: Organigrama del sistema de percepción

A partir de la imagen RGB de la cámara de la derecha se segmentan los diferentes objetos que componen la escena usando un algoritmo basado en color. En la versión sobre el dispositivo real se usará la *Red Neuronal Computacional (CNN) ERNet* desarrollada por el grupo de la UAH [12]. Con esta información junto con la nube de puntos obtenida de

imagen de profundidad, se obtiene la segmentación semántica 3D de los objetos de la escena. Por otro lado, a partir de la nube de puntos obtenida del LiDAR 3D se realiza también una segmentación 3D de los objetos usando el método referenciado en [1].

Finalmente se hace una fusión de los objetos detectados por visión y por el LiDAR basada en la distancia Euclídea de sus centroides y el solape entre los paralelepípedos que circunscriben las nubes de puntos de cada objeto, tal como se muestra en la Figura 4. De esta forma se obtiene la posición 3D, el volumen y la clase cada uno de los objetos detectados. Para cada uno de ellos se realiza un seguimiento basado en filtro de Kalman [7], con la intención de obtener la predicción de su posición.

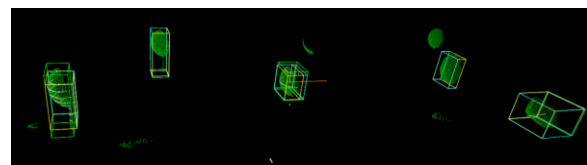


Figura 4: Objetos identificados e inscritos en paralelepípedos para mejor visualización

En la Figura 5 se muestran la carretera y los obstáculos detectados en el RViz de ROS, con respecto a la posición del vehículo, representados mediante esferas amarillas. Añadiendo la posición GPS del vehículo se puede referenciar el mapa de obstáculos al mapa global del entorno.

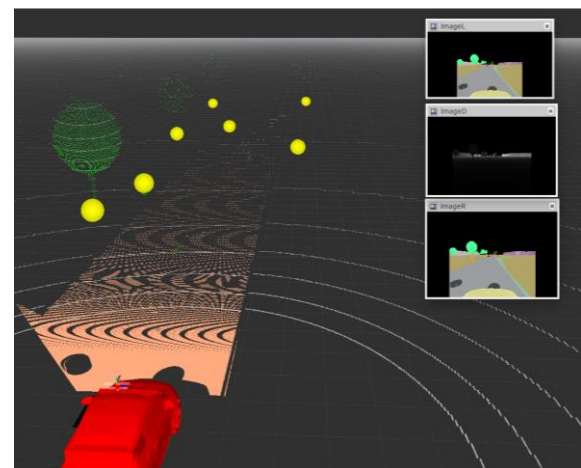


Figura 5: Carretera y obstáculos detectados tras segmentar la imagen

4.4 PLANIFICACIÓN

La planificación de un camino factible es uno de los primeros pasos para lograr una conducción totalmente autónoma. Se ha dividido esta tarea en dos etapas diferentes, una a nivel global y otra a nivel local.

4.4.1 Planificación de rutas

En entornos abiertos, el primer paso para planificar una ruta factible es generar un plan global utilizando una rejilla de ocupación. En el caso de conducción autónoma, se dispone de un mapa detallado de las carreteras, por lo que las restricciones de movimiento (velocidad, puntos de parada, carriles, etc.) están bien delimitadas. Por esta razón, en lugar de un planificador global tradicional, empleamos un planificador de rutas. Este planificador de rutas recibe dos posiciones GPS, inicio y meta, y recupera una lista de nodos del mapa topológico que se debe recorrer en orden para seguir el plan.

4.4.2 Planificación de trayectorias

Una vez que se dispone de la lista de nodos a través de los cuales debe conducir el vehículo, debe ser trazada una trayectoria factible. El enfoque principal es generar una serie de puntos de paso equidistantes en la línea central del carril (*centerline*), que es generalmente la zona de conducción más deseable. Después de obtener la lista de puntos de paso objetivo, usamos el algoritmo *pure pursuit* [3] para seguir la trayectoria discretizada. Este algoritmo publica en cada ciclo de control un comando de velocidad (tangencial y angular) que describe un radio constante en cada instante infinitesimal. Este radio hace que el robot se dirija hacia el siguiente punto objetivo. El *lookahead* (distancia que establece el punto que “persigue” el vehículo) se ajusta de tal manera que disminuye a baja velocidad y con grandes curvaturas del carril, al igual que haría un conductor. Esta estrategia permite que el algoritmo adapte la distancia objetivo para seguir correctamente la trayectoria.

4.5 GESTIÓN DE COMPORTAMIENTOS

El planificador de trayectorias se encarga de obtener la secuencia de *lanelets* entre dos puntos. No obstante, estos *lanelets* pueden ser de distinto tipo según formen parte de una carretera sin cruces, un cruce de dos vías con preferencia, un cruce con semáforo, etc. En la solución que aquí se propone se define un comportamiento distinto para cada uno de los tipos de *lanelets*. La entrada a estos comportamientos son eventos producidos por una serie de monitores u observadores similares a los presentados en [2].

La secuencia de acciones y eventos que forman parte de un comportamiento se implementa mediante redes de Petri usando una herramienta de la Universidad de Vigo llamada *RoboGraph* [4]. Para ello, cada comportamiento es definido mediante una o varias Redes de Petri usando la herramienta *RoboGraph*

Editor mientras que su ejecución la lleva a cabo *RoboGraph Dispatch*.

Dispatch se encarga de la ejecución de las distintas acciones de la capa funcional (acciones básicas), ejecutiva (otras redes de Petri) e interfaces, así como de la sincronización con los eventos producidos. La interacción con los módulos de la arquitectura se realiza mediante la publicación y suscripción de mensajes. De esta manera, los problemas que se puedan producir en un módulo, como un bloqueo, no provocará el bloqueo del *Dispatch*. Incluso mediante un simple mecanismo se puede detectar el error y recuperarse de un fallo en determinadas situaciones.

Dispatch forma parte de la herramienta de gestión de tareas *RoboGraph* (www.webs.uvigo.es/vigobot). *RoboGraph* utiliza redes de Petri jerarquizadas e interpretadas para coordinar la actividad de dichos módulos. Las tareas se definen utilizando un editor de redes de Petri interpretadas y se guardan en un fichero XML. *Dispatch* es el programa de ejecución que se encarga de cargar estos ficheros y ejecutar las redes de Petri cada vez que un nodo del sistema lo solicite mediante el envío del correspondiente mensaje. Por otro lado, se dispone de un programa para monitorizar la evolución de las redes de Petri en ejecución, muy útil para depuración y trazado.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Se ha llevado a cabo de forma exitosa la simulación de un vehículo comercial controlado mediante nodos desarrollados bajo el sistema ROS. Se ha mapeado el campus externo de la UAH y se ha logrado conducir por sus carriles siguiendo la línea central mediante el algoritmo de seguimiento de trayectoria *pure pursuit*. En la Figura 6 se muestra el trazado del vehículo tras realizar un cambio de sentido en una rotonda.

Se sigue trabajando en técnicas que aporten al vehículo información sobre los obstáculos estáticos y dinámicos (anticipándose a su futura posición).

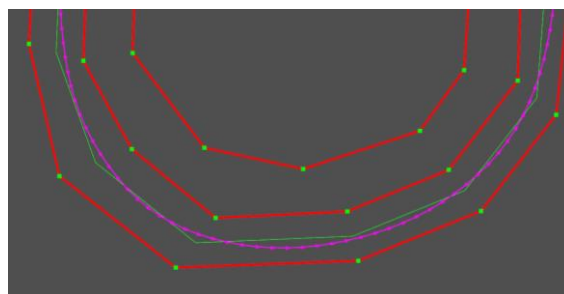


Figura 6: Trazado del coche (fucsia) después de conducir a través de una rotonda. El coche sigue la línea central (verde) del carril (rojo) derecho.

Se está trabajando en un módulo de navegación reactiva que pueda asegurarse de mantener el coche dentro del carril y evitar los posibles obstáculos dinámicos que se encuentre.

Agradecimientos

La investigación presentada en este artículo ha sido financiada por los siguientes proyectos de investigación del Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad del Ministerio de Economía y Competitividad: Vehículo inteligente para personas mayores (TRA2015-70501-C2-1-R (MINECO/FEDER)) y *Smartelderlycar*: control y planificación de rutas (TRA2015-70501-C2-2-R (MINECO/FEDER)).

Referencias

- [1] Aldoma, A., Marton, Z-C., Tombari, F., Wohlking, W., Potthast, C., Zeisl, B., Rusu, R.B., Gedikli, S., and Vincze, M., (2012) "Point Cloud Library: Three-Dimensional Object Recognition and 6 DOF Pose Estimation", *IEEE Robotics & Automation Magazine* pp. 80-91.
- [2] Beeson, P., O'Quin, J., Gillan, B., Nimmagadda, T., Ristroph, M., Li, D., and Stone, P., (2008) "Multiagent interactions in urban driving", *Journal of Physical Agents*. Vol. 2(1), pp. 15-29.
- [3] Coulter, R., (1992) Implementation of the pure pursuit path-tracking algorithm, Carnegie Mellon University, the Robotics Institute, Pittsburgh, Pa.
- [4] Fernández, J. L., Sanz, R., Paz, E., and Alonso, C., (2008) "Using hierarchical binary Petri nets to build robust mobile robot applications: RoboGraph", in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2008)*, Vol. I, pp. 1372-1377.
- [5] Ivaldi, S., Padois, V., and Nori, F., (2014) Tools for dynamics simulation of robots: a survey based on user feedback. *arXiv preprint arXiv:1402.7050*.
- [6] Jazar, R., (2014) *Vehicle dynamics* (2nd ed.), New York, Springer New York.
- [7] Kalman filter OpenCV tutorial, http://docs.opencv.org/trunk/dd/d6a/classcv_1_1KalmanFilter.html
- [8] Nogueira, L., (2014) "Comparative Analysis between Gazebo and V-REP Robotic Simulators", *Seminario Interno de Cognicao Artificial - SICA 2014*, pp. 5.
- [9] REP 103 -- Standard Units of Measure and Coordinate Conventions, (2017) Ros.org, retrieved 15 June 2017, from <http://www.ros.org/reps/rep-0103.html>.
- [10] REP 105 -- Coordinate Frames for Mobile Platforms, (2017) Ros.org, retrieved 15 June 2017, from <http://www.ros.org/reps/rep-0105.html>.
- [11] Rohmer, E., Singh, S. P., and Freese, M., (2013) "V-REP: A versatile and scalable robot simulation framework" in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1321-1326.
- [12] Romera, E., Álvarez, J.M^a. Bergasa, L.M., Arroyo, R., (2017) "Efficient ConvNet for Real-time Semantic Segmentation", in *Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*, pp. 1789-1794.
- [13] ROS Web page, <http://www.ros.org/>
- [14] sensor_msgs/Image Documentation. (2017) Docs.ros.org, retrieved 15 June 2017, from http://docs.ros.org/indigo/api/sensor_msgs/html/msg/Image.html.
- [15] V-REP simulator Web page, <http://www.coppeliarobotics.com/>
- [16] V-REP User Manual (2017), Coppeliarobotics.com, retrieved 15 June 2017, from <http://www.coppeliarobotics.com/helpFiles/>.
- [17] Ziegler, J., Bender, P., Dang, T., and Stiller, C., (2014) "Trajectory planning for Bertha—A local, continuous method", in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*, pp. 450-457.

Cinemática y prototipado de un manipulador paralelo con centro de rotación remoto para robótica quirúrgica

Francisco Pastor, Juan M. Gandarias y Jesús M. Gómez-de-Gabriel
 Dto. de Ingeniería de Sistemas y Automática
 Universidad de Málaga
 jmgandarias@uma.es

Resumen

En este artículo se presenta el modelo cinemático de un robot paralelo y la construcción de un prototipo de dos grados de libertad, cuyo objeto es servir como posicionador de instrumentos de cirugía laparoscópica. El robot tiene una configuración en paralelo, con estructura de mecanismo de cinco barras con ejes no paralelos, con dos articulaciones activas. La particularidad de este mecanismo reside en su forma no planar, es decir, los ejes de las articulaciones del robot no se encuentran en un mismo plano, sino que sus extensiones se cortan en un punto remoto, sobre el cual pivota el elemento terminal del manipulador. El espacio de trabajo de este prototipo en un casquete esférico con centro en el puerto de entrada en el paciente. Al no tratarse de un manipulador de cadena abierta, su cinemática es más compleja. En este trabajo se presenta el modelo cinemático inverso para control en coordenadas esféricas, y su validación mediante la construcción de un prototipo.

Palabras clave: Robótica, Manipulador paralelo, Cirugía mínimamente invasiva, Modelo cinemático, Arduino, Matlab, Impresión 3D.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el uso de la cirugía mínimamente invasiva o *Minimally Invasive Surgery* (MIS) es el estándar que se ha impuesto sobre la cirugía abierta debido principalmente a que la MIS genera menores incisiones en el paciente y cicatrices más pequeñas, por lo que se tienen periodos de recuperación más cortos y menores complicaciones post-operatorias [2]. No obstante, estas técnicas presentan un rendimiento quirúrgico limitado para aquellos procedimientos que implican caminos anatómicos complejos entre la vía de acceso, el punto de entrada y los sitios operativos [15] creando así un campo de aplicación interesante para la aplicación de la robótica [7, 6].

Los robots quirúrgicos están transformando la cirugía desde finales del siglo XX y, hoy en día, existen ya diversos trabajos en los que se contem-

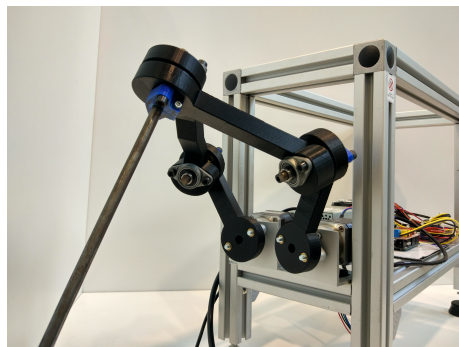


Figura 1: Prototipo de manipulador paralelo con centro de rotación remoto.

plan las tecnologías asociadas al uso de la cirugía robótica mínimamente invasiva, o *Robotic Minimally Invasive Surgery* (RMIS), y las ventajas que presenta. En este sentido, existe la tendencia de aumentar las capacidades sensoriales del operador, tanto visuales como hápticas, aplicándose tecnologías como la visión 3D [1], o la realimentación de fuerzas [16, 10].

Además, existen otros sistemas utilizados en investigación, como el *DLR MIRO* [13], *Telelap Alf-x* [14] y el *RAVEN II* [4]. Muchos de estos sistemas presentan estrategias de control en base a un punto remoto de movimiento o *Remote-Center-Motion* (RCM), como los que se presentan en [5, 10]. Los RMIS están diseñados para causar la menor incisión posible en el paciente, por lo que los instrumentos quirúrgicos deben pivotar en torno al punto de incisión RCM [9].

El Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga ha desarrollado con anterioridad asistentes de cirugía robótica y estrategias de control en base a un RCM [11, 3, 12].

En este trabajo se presenta el desarrollo del modelo cinemático inverso y la implementación de un manipulador de dos grados de libertad (Véase figura 1), cuyo efector final realiza cambios de orientación en dos rotaciones (coordenadas esféricas), sobre un punto de pivote remoto. Está basado en la idea original de Frank Kolkman [8], que se construye mediante equipos de bajo coste que incluyen

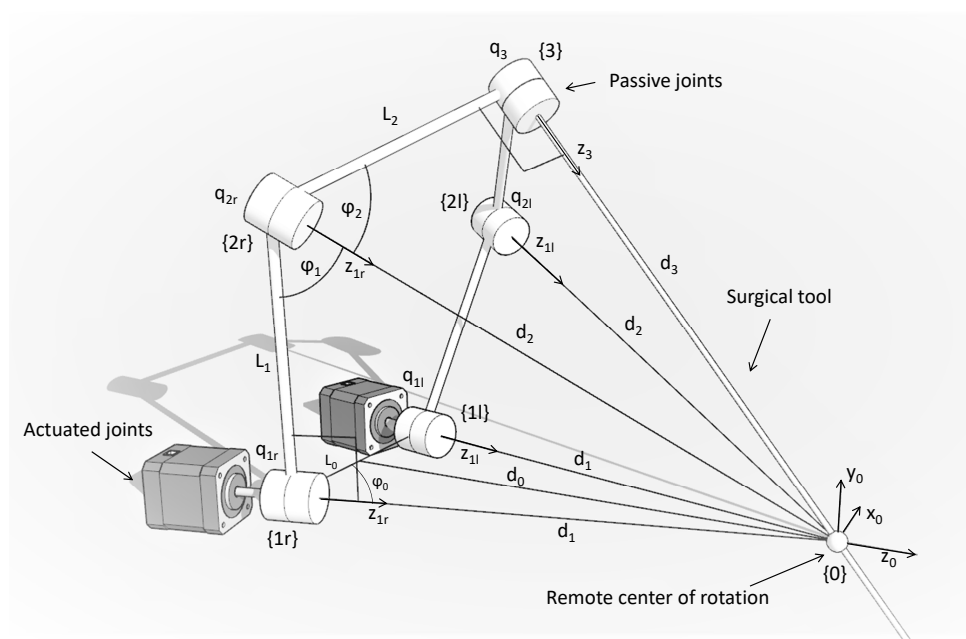


Figura 2: Representación de la posición y orientación de los sistemas de referencia que definen el mecanismo, así como de los parámetros del modelo.

motores paso a paso, controlador Arduino y eslabones construidos mediante impresión 3D. El software de cálculo de los modelos cinemáticos y control de alto nivel se implementan en *matlab* sobre un PC.

En la sección 2 se definen las características cinemáticas, la configuración y los parámetros del sistema. En la sección 2 se desarrolla la cinemática inversa del manipulador, se presenta el espacio de trabajo y se representan distintas las de las coordenadas articulares para distintas trayectorias rectilíneas de las coordenadas de la tarea. Posteriormente, en la sección 4 se describen el prototipo construido y los resultados obtenidos con su uso. Finalmente, en la sección 5 se describen las conclusiones y se plantean posibles trabajos futuros.

2. MODELO DEL MANIPULADOR

El mecanismo articulado que conforma la geometría del robot se trata de un pantógrafo no-planar, en el que cada uno de los eslabones describe su movimiento en un plano del espacio que es distinto para cada eslabón. Los eslabones no se pueden representar en verdadera magnitud en un mismo plano, ya que cada par de eslabones forma un determinado ángulo en cada uno de los planos formados por cualquiera de dos de los tres ejes principales del sistema de referencia global, como aparece en la figura 2.

El robot dispone de dos grados de libertad en con-

figuración paralela con dos articulaciones activas, de manera que todas las articulaciones se orientan en torno al RCM, en este caso, el punto de incisión al paciente $\{0\}$. Para que esto ocurra, los ejes de las articulaciones deben cortarse en ese punto, tal y como se muestra en la figura 2, consiguiéndose una gran maniobrabilidad al mismo tiempo que se mantiene un único punto de incisión.

La estructura es simétrica. Se definen los sistemas de referencia asociados a los ejes activos $\{1r\}$ y $\{1l\}$, los ejes pasivos $\{2r\}$ y $\{2l\}$ y el eje pasivo central $\{3\}$ que soporta el efector final. Los ejes Z de todos estos sistemas de referencia se cortan en un punto, definido por el origen del sistema $\{0\}$. Dada la simetría del modelo, únicamente se va a describir la cadena cinemática del brazo derecho, siendo la del brazo izquierdo análoga.

El vector de coordenadas de la tarea X está compuesto por los ángulos de elevación y giro, α y β respectivamente, del sistema de referencia del efector final $\{3\}$, con respecto al sistema de origen $\{0\}$, tal y como se muestra en la figura 3.

Se ha generalizado la estructura cinemática del manipulador mediante los parámetros de diseño d_1 , L_0 , L_1 y L_2 , y se han obtenido las ecuaciones respecto a ellos. Los ángulos de rotación de los eslabones se calculan para mantener la condición de corte de todos sus ejes Z . De esta manera se pueden utilizar las expresiones obtenidas tanto para la construcción de un prototipo como para el cálculo de su modelo cinemático inverso.

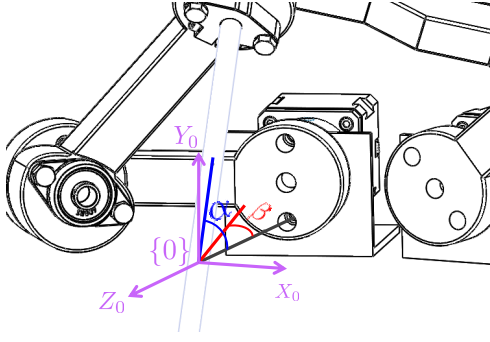


Figura 3: Vista de los ángulos α y β que definen las coordenadas en el espacio de la tarea.

En la imagen de la figura 4 se presentan las transformaciones homogéneas que definen el modelo del mecanismo. Las ecuaciones 1.a, 1.b, 1.c y 1.d detallan el cálculo simbólico de las transformaciones de la cadena cinemática derecha, siendo la de la izquierda análoga a ésta.

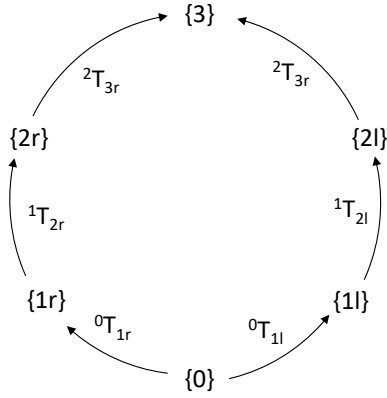


Figura 4: Grafo con las transformaciones homogéneas que conforman los sistemas de referencia definidos en el robot.

$${}^0\mathbf{T}_3 = \mathbf{R}_x(\alpha) \mathbf{R}_y(-\beta) \mathbf{D}_z(-d_3) =$$

$$= \begin{bmatrix} c_\beta & 0 & -s_\beta & d_3 s_\beta \\ -s_\alpha s_\beta & c_\alpha & -c_\beta s_\alpha & d_3 c_\beta s_\alpha \\ c_\alpha s_\beta & s_\alpha & c_\alpha c_\beta & -d_3 c_\alpha c_\beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.a)$$

$${}^0\mathbf{T}_{1r} = \mathbf{D}_x(-L_0/2) \mathbf{D}_z(-d_0) \mathbf{R}_y(90 - \varphi_0) =$$

$$= \begin{bmatrix} s_{\varphi_0} & 0 & c_{\varphi_0} & -\frac{L_0}{2} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -c_{\varphi_0} & 0 & s_{\varphi_0} & -d_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.b)$$

$${}^{1r}\mathbf{T}_{2r} = \mathbf{R}_z(q_{1r} + 90) \mathbf{D}_x(L_1) \mathbf{R}_y(-(90 - \varphi_1)) =$$

$$= \begin{bmatrix} -s_{\varphi_1} s_{q_{1r}} & -c_{q_{1r}} & c_{\varphi_1} s_{q_{1r}} & -L_1 s_{q_{1r}} \\ c_{q_{1r}} s_{\varphi_1} & -s_{q_{1r}} & -c_{\varphi_1} c_{q_{1r}} & L_1 c_{q_{1r}} \\ c_{\varphi_1} & 0 & s_{\varphi_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.c)$$

$${}^{2r}\mathbf{T}_3 = \mathbf{R}_z(q_{2r}) \mathbf{D}_x(L_2) \mathbf{R}_y(-(90 - \varphi_2)) =$$

$$= \begin{bmatrix} c_{q_{2r}} s_{\varphi_2} & -s_{q_{2r}} & -c_{\varphi_2} c_{q_{2r}} & L_2 c_{q_{2r}} \\ s_{q_{2r}} s_{\varphi_2} & c_{q_{2r}} & -c_{\varphi_2} s_{q_{2r}} & L_2 s_{q_{2r}} \\ c_{\varphi_2} & 0 & s_{\varphi_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.d)$$

3. MODELO CINEMÁTICO INVERSO

3.1. Obtención del modelo

El objetivo del modelo cinemático inverso es obtener los valores del ángulo de giro de cada uno de los motores, q_{1r} y q_{1l} , necesarios para obtener los valores de los ángulos de elevación y giro deseados, α y β respectivamente. A partir de las transformaciones homogéneas calculadas anteriormente se puede obtener el modelo cinemático inverso mediante igualación de matrices, imponiendo las restricciones físicas del mecanismo. Sin embargo, este cálculo analítico presenta un alto grado de dificultad, por lo que el modelo cinemático se ha obtenido de forma geométrica, y se describe a continuación. Las ecuaciones y cálculos que aparecen a continuación hacen referencia a la cadena cinemática del brazo derecho, pudiendo obtenerse las del brazo izquierdo de forma análoga.

En primer lugar, hay que calcular los parámetros auxiliares del modelo φ_0 , φ_1 , φ_2 , d_0 y d_3 a partir de los parámetros de diseño (ecuaciones 2.a, 2.b, 2.c, 2.d y 2.e).

$$\varphi_0 = \arccos\left(\frac{L_0}{2d_1}\right) \quad (2.a)$$

$$\varphi_1 = \arctan\left(\frac{d_1}{L_1}\right) \quad (2.b)$$

$$\varphi_2 = \arctan\left(\frac{d_3}{L_2}\right) \quad (2.c)$$

$$d_0 = \sqrt{d_1^2 - \left(\frac{L_0}{2}\right)^2} \quad (2.d)$$

$$d_3 = \sqrt{L_1^2 + d_1^2 - L_2^2} \quad (2.e)$$

A partir de estos parámetros y del grafo de la figura 4 se obtiene la transformación ${}^{1r}T_3$ tal según la ecuación 3.a.

$${}^{1r}T_3 = {}^0T_{1r}^{-1} {}^0T_3 \quad (3.a)$$

A partir de esta transformación homogénea podemos calcular la distancia euclídea que existe entre los sistemas de referencia $\{3\}$ y $\{1r\}$ como la norma de la diferencia de los vectores de posición de ambos sistemas (ecuación 4.a).

$$\overline{O_1O_3} = \|{}^{1r}P_3 - {}^0P_3\| \quad (4.a)$$

Por otro lado, a partir de esta distancia y basándonos en los triángulos que se presentan en la figura 5 se obtienen las relaciones geométricas que permiten calcular la distancia $\overline{O_1O_2}$ (ecuaciones 5.a, 5.b, 5.c y 5.d).

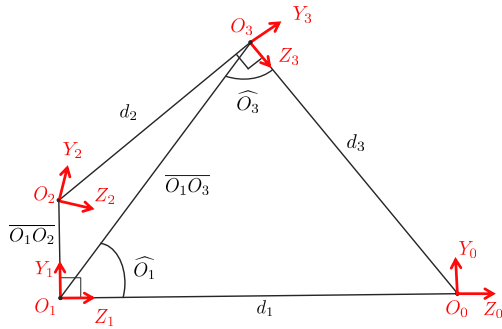


Figura 5: Triángulos que forman los sistemas de referencia $\{0\}$, $\{1r\}$ y $\{3\}$ y $\{1r\}$, $\{2r\}$ y $\{3\}$ desde la vista lateral del robot.

$$\widehat{O_3} = \arccos \left(\frac{\overline{O_1O_3}^2 + d_3^2 - d_1^2}{2 \overline{O_1O_3} d_3} \right) \quad (5.a)$$

$$\widehat{O_1} = \arcsin \left(\frac{d_3}{d_1} \sin(\widehat{O_3}) \right) \quad (5.b)$$

$$\widehat{O_{1'}} = 90 - \arcsin \left(\frac{\overline{O_1O_2}}{L_1} \right) \quad (5.c)$$

$$\overline{O_1O_2} = \overline{O_1O_3} \frac{\cos(\widehat{O_3})}{\sin(\widehat{O_1} + \widehat{O_3})} \quad (5.d)$$

Finalmente, partiendo de los valores calculados anteriormente y en base a los triángulos de la figura 6, se pueden obtener las relaciones geométricas para el cálculo de q_{1r} (ecuaciones 6.a y 6.b).

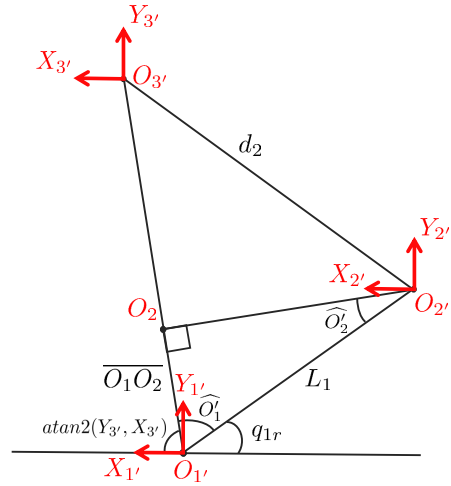


Figura 6: Triángulos que forman los sistemas de referencia $\{0\}$, $\{1r\}$ y $\{3\}$ desde la vista posterior del robot.

$$\widehat{O_{1'}} = 90 - \arcsin \left(\frac{\overline{O_1O_2}}{L_1} \right) \quad (6.a)$$

$$q_{1r} = 180 - \arctan \left(\frac{Y_{3'}}{X_{3'}} \right) - \widehat{O_{1'}} \quad (6.b)$$

Siendo $X_{3'}$, $Y_{3'}$ las componentes X e Y del vector de posición de la transformación homogénea ${}^{1r}T_3$ obtenida en 3.a.

3.2. Espacio de trabajo y generación de trayectorias

Una vez obtenido el modelo cinemático inverso, se puede representar el espacio de trabajo del manipulador. Previamente, por seguridad, se ha limitado el rango de movimiento de cada articulación activa, imponiéndose las condiciones de que q_{1r} y q_{1l} no puedan ser mayores de 90° ni menores de -90° . De esta manera se evita que el brazo izquierdo pueda invadir el espacio de trabajo del brazo derecho y viceversa. Asimismo, se han empleado los siguientes parámetros de diseño: $d_1 = 181,883mm$, $L_0 = 60,497mm$, $L_1 = 88,218mm$ y $L_2 = 136,635mm$. El espacio de trabajo resultante se muestra en la figura 7.

Por otro lado, las gráficas de la figura 8 representan los valores necesarios de q_{1r} y q_{1l} (gráfica inferior) según distintos valores de α y β (gráfica superior) para la generación de trayectorias rectilíneas con variaciones de α manteniendo β constante (a), variaciones de β manteniendo α constante (b), y para variaciones lineales de α y β (c).

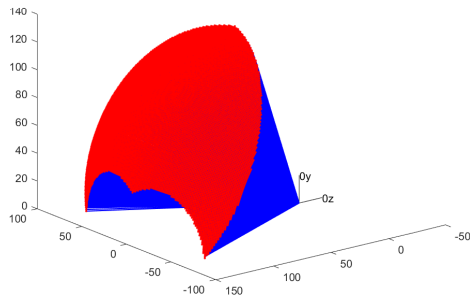


Figura 7: Espacio de trabajo del manipulador imponiendo las condiciones de seguridad $q_{1r,1l} < 90^\circ$ y $q_{1r,1l} > -90^\circ$, y con los parámetros de diseño $d_1 = 181,883mm$, $L_0 = 60,497mm$, $L_1 = 88,218mm$ y $L_2 = 136,635mm$.

4. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Para llevar a cabo los experimentos, se ha construido un prototipo utilizando técnicas de fabricación aditivas con impresoras 3D comerciales con tecnología FDM (Modelado de Fusión por Deposición). El sistema de actuación está compuesto por dos motores bipolares Nema 17 paso a paso con reductora planetaria de relación 5.18:1. Finalmente, como electrónica de control, se ha elegido un Arduino UNO con un CNC shield. Además, se han utilizado los mismos valores de los parámetros de diseño que para la representación del espacio de trabajo ($d_1 = 181,883mm$, $L_0 = 60,497mm$, $L_1 = 88,218mm$ y $L_2 = 136,635mm$).

El esquema de la figura 9 representa el flujo de trabajo del sistema que ha sido implementado para llevar a cabo dos experimentos. Tomando como entrada el vector de coordenadas de la tarea $X = (\alpha, \beta)^T$, se calcula, con el modelo cinemático inverso, el vector de variables articulares $q = (q_{1r}, q_{1l})$. Posteriormente, se genera un código G mediante el *script* de *matlab CodeGen.m*, que se envía a la electrónica de control, donde es interpretado por el *firmware Grbl*, previamente cargado. A continuación, el sistema de control genera las señales u_r y u_l de los motores derecho e izquierdo respectivamente, que producen un giro q_{1r} y q_{1l} que provocan, a su vez, el movimiento del manipulador.

En la figura 10 se muestran distintas configuraciones del sistema. En el experimento 1 (imágenes (a) y (b)) se han introducido los valores $\alpha = 61,81^\circ$ y $\beta = 0^\circ$, mientras que en el experimento 2 (imágenes (c) y (d)) se han utilizado los valores $\alpha = 37,67^\circ$ y $\beta = 9,73^\circ$. Se puede ver cómo los

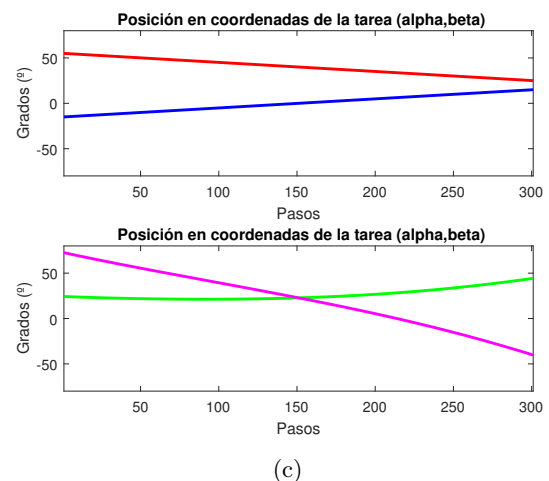
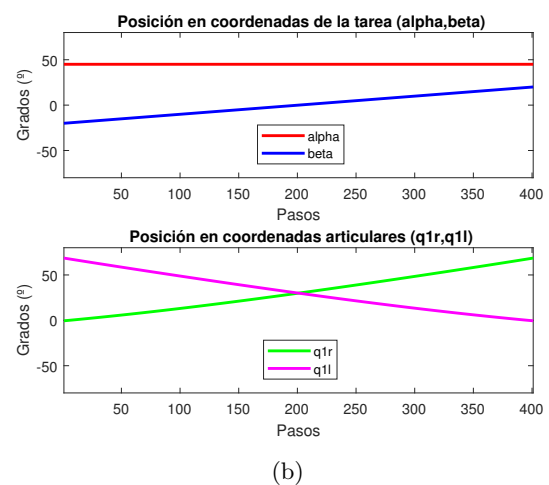
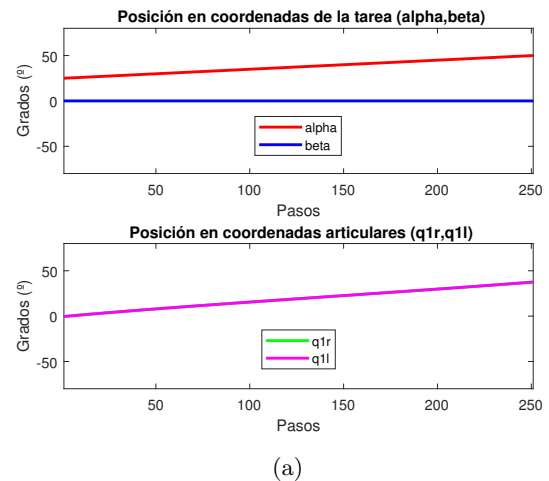


Figura 8: Representación gráfica de las variaciones de q_{1r} y q_{1l} (gráfica inferior) según distintos valores de α y β (gráfica superior) para la generación de trayectorias rectilíneas con variaciones de α manteniendo β constante (a), de β manteniendo α constante (b), y cambios lineales de α y β (c).

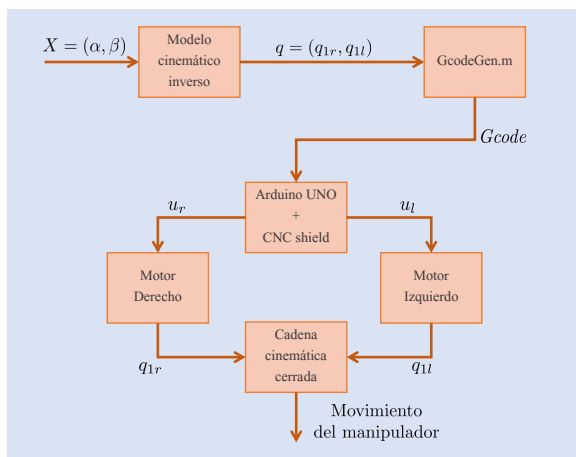


Figura 9: Representación esquemática del funcionamiento del sistema.

ángulos α y β son aproximadamente los deseados. Hay que tener en cuenta que no se han desarrollado métodos de medición de los valores reales, habiéndose obtenido únicamente por observación.

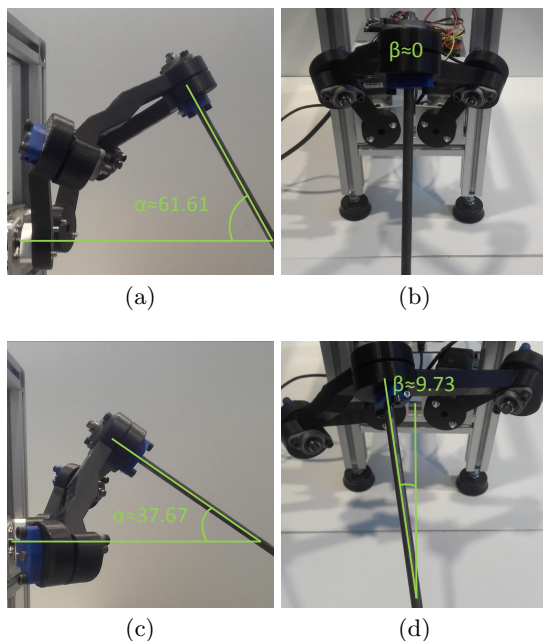


Figura 10: Experimentos con el prototipo físico. El experimento 1 (imágenes (a) y (b)) se ha realizado con los valores $\alpha = 61,81^\circ$ y $\beta = 0^\circ$, mientras que el experimento 2 (imágenes (c) y (d)) con $\alpha = 37,67^\circ$ y $\beta = 9,73^\circ$.

Por otro lado, se ha implementado un simulador sencillo en *matlab*. La imagen de la figura 11 muestra una representación gráfica de la configuración del mecanismo, que puede servir como herramienta de simulación, ya que permite ver la configuración de las articulaciones y sistemas de referencia del mecanismo para unas coordenadas de la tarea determinadas.

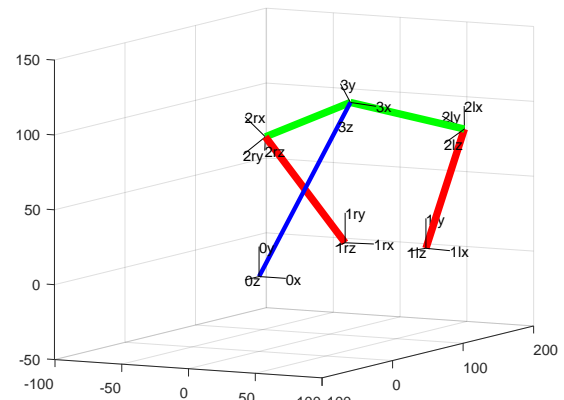


Figura 11: Herramienta sencilla de simulación desarrollada en *matlab* que permite observar la configuración de los sistemas de referencia para unos valores de α y β determinados.

5. CONCLUSIONES

Se ha diseñado un robot de 2 grados de libertad con objeto de servir como posicionador de instrumentos quirúrgicos de operaciones laparoscópicas. El mecanismo del robot conforma un pantógrafo no planar de 5 barras, de manera que todas las articulaciones se orientan en torno al centro de movimiento remoto (*RCM*). Además se ha obtenido el modelo cinemático inverso, y se ha establecido el espacio de trabajo y representado gráficamente las variaciones de las coordenadas articulares en función de trayectorias rectilíneas de las coordenadas de la tarea. Por otro lado, se ha construido un prototipo con técnicas de fabricación aditivas de impresión 3D, con el que se han realizado experimentos que demuestran el correcto funcionamiento del sistema.

Trabajos futuros pretenden incluir un sistema de actuación que permita controlar un instrumento quirúrgico posicionado en el prototipo. Asimismo, se pretenden realizar experimentos para evaluar el funcionamiento del sistema completo, con la intención de obtener los parámetros de diseño óptimos que aseguren una mayor maniobrabilidad en base a las especificaciones y características de operaciones de *MIS*.

Referencias

- [1] Bauzano, E., Fernández-Iribar, A., López-Casado, M., Klein, J., Rentería, A., and Muñoz-Martínez, V. (2015). Integración de dispositivos en un robot quirúrgico teleoperado mediante ros. In *Actas de las XXXVI Jornadas de Automática*, pages 815–822. Comité Español de Automática de la IFAC (CEA-IFAC).

- [2] Carbajo, M., Del Olmo, J. M., Blanco, J., De la Cuesta, C., Toledano, M., Martin, F., Vaquero, C., and Inglada, L. (1999). Laparoscopic treatment vs open surgery in the solution of major incisional and abdominal wall hernias with mesh. *Surgical endoscopy*, 13(3):250–252.
- [3] Gómez-de Gabriel, J. M., Muñoz-Martínez, V. F., Domínguez-Fernández, F. J., and Serón-Barba, J. (2007). Technologies for a telesurgery laboratory implementation. In *Advances in Telexrobotics*, pages 403–414. Springer.
- [4] Hannaford, B., Rosen, J., Friedman, D. W., King, H., Roan, P., Cheng, L., Glozman, D., Ma, J., Kosari, S. N., and White, L. (2013). Raven-ii: an open platform for surgical robotics research. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 60(4):954–959.
- [5] Hassan, T., Hameed, A., Nisar, S., Kamal, N., and Hasan, O. (2016). Al-zahrawi: a telesurgical robotic system for minimal invasive surgery. *IEEE Systems Journal*, 10(3):1035–1045.
- [6] Kaplan, K. E., Nichols, K. A., and Okamura, A. M. (2016). Toward human-robot collaboration in surgery: performance assessment of human and robotic agents in an inclusion segmentation task. In *Robotics and Automation (ICRA), 2016 IEEE International Conference on*, pages 723–729. IEEE.
- [7] Kim, C. W., Kim, C. H., and Baik, S. H. (2014). Outcomes of robotic-assisted colorectal surgery compared with laparoscopic and open surgery: a systematic review. *Journal of Gastrointestinal Surgery*, 18(4):816–830.
- [8] Kolkman, F. (2015). Opensurgery. (<http://opensurgery.net/>) Acceso online el 05/06/17.
- [9] Locke, R. C. and Patel, R. V. (2007). Optimal remote center-of-motion location for robotics-assisted minimally-invasive surgery. In *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, pages 1900–1905. IEEE.
- [10] Madhani, A. J., Niemeyer, G., and Salisbury, J. K. (1998). The black falcon: a teleoperated surgical instrument for minimally invasive surgery. In *Intelligent Robots and Systems, 1998. Proceedings., 1998 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 2, pages 936–944. IEEE.
- [11] Martínez, V., Morales, I., Lozano, J., De Gabriel, J., Cerezo, A., Pulgar, C., Barba, J., Fernández, F., Thorbeck, C., and Méndez, R. (2009). Robotic system for assisting in minimally-invasive surgery, which can position a surgical instrument in response to orders from a surgeon, is not attached to the operating table and does not require pre-calibration of the insertion point. US Patent App. 12/374,189.
- [12] Muñoz, V. F., Gómez-de Gabriel, J., García-Morales, I., Fernández-Lozano, J., and Morales, J. (2005). Pivoting motion control for a laparoscopic assistant robot and human clinical trials. *Advanced Robotics*, 19(6):694–712.
- [13] Ortmaier, T., Weiss, H., and Hirzinger, G. (2004). A new robot for minimally invasive surgery. *Lecture Notes in Computer Science on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*.
- [14] Stark, M., Benhidjeb, T., Gidaro, S., and Morales, E. R. (2012). The future of telesurgery: a universal system with haptic sensation. *Journal of the Turkish German Gynecological Association*, 13(1):74.
- [15] Vitiello, V., Lee, S.-L., Cundy, T. P., and Yang, G.-Z. (2013). Emerging robotic platforms for minimally invasive surgery. *IEEE reviews in biomedical engineering*, 6:111–126.
- [16] Wottawa, C. R., Genovese, B., Nowroozi, B. N., Hart, S. D., Bisley, J. W., Grundfest, W. S., and Dutson, E. P. (2016). Evaluating tactile feedback in robotic surgery for potential clinical application using an animal model. *Surgical endoscopy*, 30(8):3198–3209.

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE SINGULARIDADES AISLADAS EN ROBOTS PARALELOS MEDIANTE DESARROLLOS DE TAYLOR DE SEGUNDO ORDEN

Adrián Peidro, Óscar Reinoso, Arturo Gil, José María Marín, Luis Payá

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

Universidad Miguel Hernández, Avenida de la Universidad s/n, 03202 Elche (Alicante), España

{adrian.peidro, o.reinoso, arturo.gil, jmarin, lpaya}@goumh.umh.es

Resumen

Cuando el diseño geométrico de un robot paralelo es no-genérico, su lugar de las singularidades puede exhibir puntos aislados. Es bien sabido que dichos puntos aislados son inestables, ya que éstos se destruyen o generan/revelan cúspides cuando el diseño geométrico del robot se desvía ligeramente de un diseño no-genérico, afectando posiblemente a la habilidad del robot para reconfigurarse sin cruzar singularidades indeseables. Este artículo presenta un método basado en expansiones de Taylor de segundo orden para determinar cómo se transforman las singularidades aisladas cuando se perturban los diferentes parámetros geométricos de un robot no-genérico. El método propuesto consiste en aproximar el lugar de las singularidades por una curva cónica en el entorno de la singularidad aislada, para clasificar a continuación dicha cónica en función de las perturbaciones de los diferentes parámetros geométricos. El método presentado se ilustra mediante dos robots paralelos no-genéricos de ejemplo: los robots 3RPR y 2RPR-PR.

Palabras clave: Cúspide, Estabilidad, Robot paralelo, Serie de Taylor, Singularidad aislada

1. INTRODUCCIÓN

Este artículo presenta un método basado en desarrollos de Taylor de segundo orden para estudiar la estabilidad de singularidades cinemáticas aisladas en robots paralelos. Las singularidades aisladas son un tipo de singularidad de orden superior de gran importancia en la cinemática de estos robots, ya que guardan relación con la habilidad del robot para reconfigurarse y ampliar su espacio de trabajo sin atravesar singularidades indeseables.

Considérese un robot paralelo de 2 grados de libertad (GDL), como es habitual en el estudio de transiciones no-singulares [7], para poder visualizar las singularidades del robot en el plano. Si el robot tuviera más de 2 GDL, simplemente se bloquean todos sus actuadores salvo dos, o bien se analiza un sub-mecanismo independiente de 2 GDL del robot [13, 1]. Denotemos las coordenadas articula-

res actuadas (o variables de entrada) del robot por $\mathbf{x} = [x_1, x_2]^T$, y denotemos las variables de salida (que definen la posición y/u orientación de la plataforma móvil del robot) por $\mathbf{y} = [y_1, y_2]^T$. Debido a la cinemática del robot, \mathbf{x} e \mathbf{y} están relacionadas mediante dos ecuaciones de entrada-salida:

$$f_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0 \quad \text{y} \quad f_2(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0 \quad (1)$$

donde f_1 y f_2 son funciones de restricción. El problema cinemático directo consiste en resolver \mathbf{y} del sistema (1) dado \mathbf{x} . Para un \mathbf{x} dado, generalmente este problema tiene varias soluciones distintas que suelen llamarse *modos de ensamblado*.

Este artículo se centra en las singularidades del problema cinemático directo, que son las configuraciones en las que $\det(\mathbf{J}) = 0$, donde $\mathbf{J} = \{j_{pq}\}$ es la matriz Jacobiana 2×2 formada por las derivadas de $\{f_1, f_2\}$ con respecto a las variables de salida: $j_{pq} = \frac{\partial f_p}{\partial y_q}$ ($p, q \in \{1, 2\}$). La condición $\det(\mathbf{J}) = 0$ define el *lugar geométrico de las singularidades* del robot, que es un conjunto de curvas singulares que pueden visualizarse en los planos (x_1, x_2) o (y_1, y_2) . Cuando el robot se aproxima a una curva singular en el plano (x_1, x_2) , al menos dos modos de ensamblado distintos convergen. Cuando se cruza una singularidad, se producen problemas de control de la plataforma móvil del robot.

En este artículo estamos interesados en analizar la estabilidad de los puntos aislados del lugar de las singularidades. Cuando el diseño geométrico de un robot paralelo satisface determinadas condiciones (que dependen de la arquitectura del robot), se dice que su geometría es *no-genérica* y, en tal caso, el lugar de las singularidades exhibe puntos aislados (u otras singularidades de orden superior [13]). Dichas singularidades aisladas son inestables, ya que se destruyen o se transforman en curvas cerradas cuspidales cuando la geometría del robot se desvía ligeramente de un diseño no-genérico debido a pequeñas tolerancias en la manufactura [13, 3, 2].

Como bien se sabe, trazando trayectorias que encierran las cúspides de las curvas singulares cuspidales en el plano (x_1, x_2) , el robot puede modificar su modo de ensamblado sin atravesar singularidades [15, 5, 4, 14, 9], lo cual es beneficioso para ampliar el rango de operación del robot sin

incurrir en pérdidas de control. Por tanto, perturbar la geometría de un robot no-genérico puede afectar a su habilidad para realizar tales transiciones no-singulares entre modos de ensamblado. Por ejemplo, si dicha perturbación transforma una singularidad aislada en una curva con cúspides, éstas permitirán al robot realizar transiciones no-singulares. Por el contrario, la perturbación podría destruir la singularidad aislada, perdiendo el robot la habilidad mencionada. Por consiguiente, es importante poder predecir cómo se transformarán las singularidades aisladas cuando la geometría de un robot no-genérico es perturbada.

Este artículo presenta un método para determinar cómo se transforman las singularidades aisladas de robots paralelos cuando su geometría no-genérica es ligeramente perturbada. Para tal fin, el lugar de las singularidades del robot se aproxima por su desarrollo de Taylor de segundo orden en el entorno de la singularidad aislada, lo que equivale a aproximar el lugar de las singularidades por una cónica (véase la Sección 2). Seguidamente, el análisis de estabilidad de la singularidad aislada se reduce a clasificar dicha cónica en función de las perturbaciones de los diferentes parámetros geométricos del robot. Este método se ilustra en las Secciones 3 y 4 mediante dos robots paralelos de ejemplo. Finalmente, la Sección 5 presenta las conclusiones y trabajos futuros.

2. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MEDIANTE DESARROLLOS CUADRÁTICOS DE TAYLOR

Esta sección presenta un método basado en desarrollos en series de Taylor de segundo orden para estudiar la estabilidad de singularidades aisladas. Asíumase que la siguiente ecuación define el lugar de las singularidades en el plano (y_1, y_2) :

$$S(\mathbf{y}, \mathbf{g}) = 0 \quad (2)$$

donde $S(\mathbf{y}, \mathbf{g}) = \det(\mathbf{J})$. Dado un robot paralelo con una geometría $\mathbf{g} = [g_1, \dots, g_d]^T$, la ecuación (2) define un conjunto de curvas singulares en el plano (y_1, y_2) . La forma concreta de dichas curvas dependerá de la geometría \mathbf{g} . Asíumase que para cierta geometría no-genérica \mathbf{g}_0 , las curvas singulares exhiben un punto aislado \mathbf{y}_0 . A continuación, se aproximará S por su desarrollo en serie de Taylor de segundo orden centrado en $(\mathbf{y}_0, \mathbf{g}_0)$:

$$\begin{aligned} S(\mathbf{y}, \mathbf{g}) \approx & S(\mathbf{y}_0, \mathbf{g}_0) \\ & + \left[\frac{\partial S}{\partial \mathbf{y}}(\mathbf{y}_0, \mathbf{g}_0) \right] \Delta \mathbf{y} + \left[\frac{\partial S}{\partial \mathbf{g}}(\mathbf{y}_0, \mathbf{g}_0) \right] \Delta \mathbf{g} \\ & + [\Delta \mathbf{y}^T, \Delta \mathbf{g}^T] \frac{\mathbf{H}(\mathbf{y}_0, \mathbf{g}_0)}{2} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{y} \\ \Delta \mathbf{g} \end{bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

donde \mathbf{H} es la Hessiana de S con respecto a \mathbf{y} y \mathbf{g} , $\Delta \mathbf{y} = \mathbf{y} - \mathbf{y}_0$, y $\Delta \mathbf{g} = \mathbf{g} - \mathbf{g}_0$. Nótese que $S(\mathbf{y}_0, \mathbf{g}_0) = 0$ debido a que el punto aislado \mathbf{y}_0 pertenece a las curvas singulares correspondientes a la geometría \mathbf{g}_0 . Además, dado que \mathbf{y}_0 es un punto aislado (por tanto, un punto crítico o especial) de dichas curvas, entonces:

$$\frac{\partial S}{\partial \mathbf{y}}(\mathbf{y}_0, \mathbf{g}_0) = [0, 0] \quad (4)$$

lo cual justifica la necesidad de realizar un desarrollo en serie de Taylor hasta el término cuadrático [de otro modo, la ecuación (5) siguiente no definiría una curva en el plano (y_1, y_2)]. La sustitución de (3) en la ecuación (2) proporciona la ecuación que define el lugar de las singularidades en el entorno de la singularidad aislada \mathbf{y}_0 y de la geometría no-genérica \mathbf{g}_0 :

$$\mathbf{S}_g \Delta \mathbf{g} + [\Delta \mathbf{y}^T, \Delta \mathbf{g}^T] \frac{\mathbf{H}(\mathbf{y}_0, \mathbf{g}_0)}{2} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{y} \\ \Delta \mathbf{g} \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$

donde $\mathbf{S}_g = \frac{\partial S}{\partial \mathbf{g}}(\mathbf{y}_0, \mathbf{g}_0)$. A continuación, fragmentamos la Hessiana \mathbf{H} en cuatro bloques:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11} & \mathbf{H}_{12} \\ \mathbf{H}_{12}^T & \mathbf{H}_{22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

donde los tamaños de las matrices \mathbf{H}_{11} , \mathbf{H}_{12} , y \mathbf{H}_{22} son 2×2 , $2 \times d$, y $d \times d$, respectivamente. Mediante esta partición de la matriz \mathbf{H} , podemos reescribir la ecuación (5) como sigue:

$$[\Delta \mathbf{y}^T, 1] \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11}/2 & \mathbf{K} \\ \mathbf{K}^T & u \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{y} \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

donde:

$$\mathbf{K} = \frac{\mathbf{H}_{12} \Delta \mathbf{g}}{2} \quad y \quad u = \left(\Delta \mathbf{g}^T \frac{\mathbf{H}_{22}}{2} + \mathbf{S}_g \right) \Delta \mathbf{g} \quad (8)$$

La ecuación (7) define una cónica en el plano (y_1, y_2) . El tipo de cónica definida por dicha ecuación depende de la matriz de coeficientes \mathbf{C} [12]. Nótese que \mathbf{C} depende de la perturbación $\Delta \mathbf{g}$ de los parámetros geométricos del robot con respecto a la geometría no-genérica \mathbf{g}_0 . Por tanto, para estudiar cómo afectan dichas perturbaciones geométricas a la estabilidad de la singularidad aislada \mathbf{y}_0 , es suficiente con analizar y clasificar el tipo de cónica definida por \mathbf{C} en función de $\Delta \mathbf{g}$.

En las siguientes secciones, se aplicará este método para estudiar la estabilidad de singularidades aisladas en dos robots paralelos de ejemplo.

3. EJEMPLO 1: ROBOT 3RPR

En esta sección se aplicará el método propuesto para analizar la estabilidad de las singularidades aisladas del robot paralelo plano 3RPR. Este robot, mostrado en la Figura 1, está formado

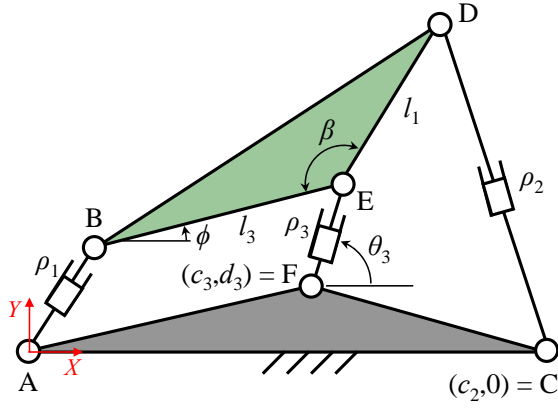


Figura 1: Robot paralelo plano 3RPR general.

por una plataforma fija AFC y una plataforma móvil BDE, estando ambas plataformas conectadas mediante tres cadenas de tipo RPR en paralelo. En este robot se emplean tres actuadores lineales $\{AB, CD, EF\}$, cuyas longitudes respectivas son $\{\rho_1, \rho_2, \rho_3\}$, para controlar la posición y la orientación de la plataforma móvil BDE. La posición de la plataforma móvil puede parametrizarse mediante las coordenadas polares (ρ_3, θ_3) de la articulación E, mientras que su orientación puede parametrizarse mediante el ángulo ϕ .

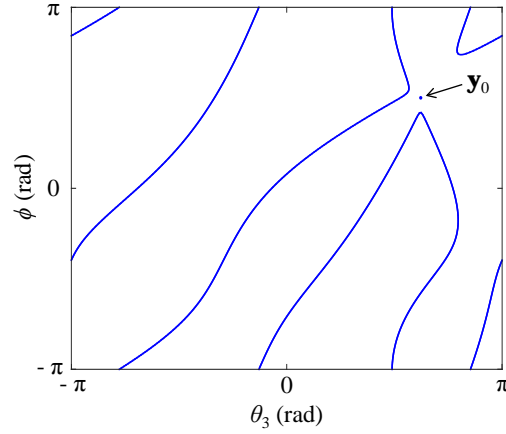
Para poder aplicar el método propuesto en la sección anterior, necesitamos trabajar con un robot de 2 GDL. Por tanto, en adelante consideraremos que bloqueamos la articulación prismática de la pata EF, de manera que su longitud ρ_3 se asumirá constante. De este modo, podremos analizar un robot de 2 GDL con variables de entrada $\mathbf{x} = [\rho_1, \rho_2]^T$ y variables de salida $\mathbf{y} = [\theta_3, \phi]^T$. El resto de parámetros indicados en la Figura 1 se considerarán como parámetros geométricos de diseño del robot, es decir: $\mathbf{g} = [c_2, c_3, d_3, l_1, l_3, \beta, \rho_3]^T$.

Para este robot, las ecuaciones que relacionan las variables de entrada y salida [ecuaciones (1)] se obtienen imponiendo las condiciones de que las longitudes de las patas AB y CD deben ser igual a ρ_1 y ρ_2 , respectivamente. Estas condiciones proporcionan las siguientes funciones de restricción:

$$f_1 = \left\| \begin{bmatrix} c_3 + \rho_3 \cos \theta_3 - l_3 \cos \phi \\ d_3 + \rho_3 \sin \theta_3 - l_3 \sin \phi \end{bmatrix} \right\|^2 - \rho_1^2 \quad (9)$$

$$f_2 = \left\| \begin{bmatrix} c_3 - c_2 + \rho_3 c_{\theta_3} + l_1 \cos(\phi + \pi - \beta) \\ d_3 + \rho_3 s_{\theta_3} + l_1 \sin(\phi + \pi - \beta) \end{bmatrix} \right\|^2 - \rho_2^2 \quad (10)$$

donde $s_{\theta_3} = \sin \theta_3$ y $c_{\theta_3} = \cos \theta_3$. El lugar de las singularidades en el plano de salida de este robot

Figura 2: Representación del lugar de las singularidades en el plano (θ_3, ϕ) , para un robot 3RPR con geometría no-genérica.

viene definido por la siguiente ecuación:

$$S(\mathbf{y}, \mathbf{g}) = \frac{\partial f_1}{\partial \theta_3} \frac{\partial f_2}{\partial \phi} - \frac{\partial f_1}{\partial \phi} \frac{\partial f_2}{\partial \theta_3} = 0 \quad (11)$$

La forma concreta del lugar de las singularidades definido por la ecuación (11) depende del valor de los parámetros geométricos \mathbf{g} . A continuación, analizaremos el lugar de las singularidades para la siguiente geometría no-genérica: $\mathbf{g}_0 = [1.4, 2, -1.5, 1.06, 1.1, 5.65 \text{ rad}, 2.800304375]^T$. Esta geometría es no-genérica porque se corresponde con un lugar de las singularidades que exhibe el siguiente punto aislado: $\mathbf{y}_0 = [1.953791747, 1.571336043]^T \text{ rad}$ (véase la Figura 2). Esta singularidad aislada es una singularidad de orden superior conocida como *lips* [13], debido a la silueta que adquiere ésta en el plano de entrada (ρ_1, ρ_2) cuando se perturba ligeramente la geometría del robot. Esta singularidad aislada es inestable ya que, al desviar ligeramente de \mathbf{g}_0 la geometría del robot, el punto aislado \mathbf{y}_0 se transforma en una curva cerrada o se destruye, pudiéndose alterar la habilidad del robot para realizar transiciones no-singulares. Seguidamente, la aplicación del análisis de la Sección 2 nos permitirá conocer cómo se transforma \mathbf{y}_0 en función de cómo se desvíe de \mathbf{g}_0 la geometría del robot.

A continuación, considérese que todos los parámetros geométricos sufren una pequeña perturbación $\Delta \mathbf{g} = [\Delta c_2, \Delta c_3, \Delta d_3, \Delta l_1, \Delta l_3, \Delta \beta, \Delta \rho_3]^T$ que los aleja de la geometría no-genérica \mathbf{g}_0 indicada en el párrafo anterior. Sustituyendo \mathbf{y}_0 y \mathbf{g}_0 en la ecuación (7), se obtiene la ecuación de una curva cónica que es una aproximación del lugar de las singularidades perturbado en el plano (θ_3, ϕ) , donde:

$$\frac{\mathbf{H}_{11}}{2} = \begin{bmatrix} -11.8582 & 0.6271 \\ 0.6271 & -2.2934 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1.9288 & -4.4937 \\ -2.6264 & 4.4935 \\ 14.9892 & -6.2409 \\ 8.8979 & 0.0256 \\ -22.3009 & 8.0256 \\ -3.0089 & 0.0440 \\ 14.3325 & -7.4679 \end{bmatrix}^T \Delta \mathbf{g} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} u = & -2.5537\Delta c_2\Delta c_3 + 3.5688\Delta c_2\Delta d_3 \\ & + 7.9784\Delta c_2\Delta l_1 - 13.481\Delta c_2\Delta l_3 + 6.2140\Delta c_2\Delta \beta \\ & + 3.3911\Delta c_2\Delta \rho_3 - 2.4456\Delta c_2 + 2.5536\Delta c_3^2 \\ & - 5.4854\Delta c_3\Delta d_3 - 7.9347\Delta c_3\Delta l_1 + 16.382\Delta c_3\Delta l_3 \\ & - 6.2154\Delta c_3\Delta \beta - 6.1244\Delta c_3\Delta \rho_3 + 2.4422\Delta c_3 \\ & - 2.6245\Delta d_3^2 - 7.0749\Delta d_3\Delta l_1 + 6.6182\Delta d_3\Delta l_3 \\ & + 13.546\Delta d_3\Delta \beta - 3.9281\Delta d_3\Delta \rho_3 - 3.1068\Delta d_3 \\ & + 3.8633\Delta l_1\Delta l_3 - 0.013636\Delta l_1\Delta \beta - 3.5808\Delta l_1\Delta \rho_3 \\ & + 0.044585\Delta l_1 - 16.061\Delta l_3\Delta \beta + 1.4638\Delta l_3\Delta \rho_3 \\ & + 4.0521\Delta l_3 - 0.023632\Delta \beta^2 + 14.882\Delta \beta\Delta \rho_3 \\ & - 0.014455\Delta \beta - 1.3549\Delta \rho_3^2 - 3.7941\Delta \rho_3 \end{aligned} \quad (14)$$

El tipo de cónica definida por la ecuación (7) depende de \mathbf{H}_{11} , \mathbf{K} , y u [12]. En primer lugar, dado que $\det(\mathbf{H}_{11}) > 0$, entonces el lugar de las singularidades perturbado es una elipse (real o imaginaria). El tipo de elipse definida por la ecuación (7) dependerá del signo de $\omega = c_{11}\det(\mathbf{C})$, donde c_{11} es el primer elemento de la primera fila de \mathbf{C} : si $\omega > 0$, entonces la ecuación (7) define una elipse imaginaria, mientras que si $\omega < 0$, dicha elipse es real. Si $\omega = 0$, la elipse degenera en un único punto aislado. La perturbación $\Delta \mathbf{g}$ de los parámetros geométricos determinará el signo de ω y, por tanto, determinará el tipo de elipse en la que el punto aislado \mathbf{y}_0 se transforma cuando la geometría del robot se desvía ligeramente de \mathbf{g}_0 .

3.1. PERTURBACIÓN DE UN PARÁMETRO GEOMÉTRICO

Por simplicidad, considérese primero que únicamente se perturba el parámetro ρ_3 , es decir, $\Delta \mathbf{g} = [0, 0, 0, 0, 0, 0, \Delta \rho_3]^T$. En tal caso:

$$\omega = (1206.22 - 11406.38\Delta \rho_3)\Delta \rho_3 \quad (15)$$

Representando gráficamente la ecuación (15) en la Figura 3, podemos identificar tres casos para perturbaciones $\Delta \rho_3$ suficientemente pequeñas:

- Si $\Delta \rho_3 < 0$, entonces $\omega < 0 \rightarrow$ el lugar de las singularidades es una elipse real.
- Si $\Delta \rho_3 > 0$, entonces $\omega > 0 \rightarrow$ el lugar de las singularidades es una elipse imaginaria.
- Si $\Delta \rho_3 = 0$, entonces $\omega = 0 \rightarrow$ el lugar de las singularidades es una elipse real que ha degenerado en el punto \mathbf{y}_0 .

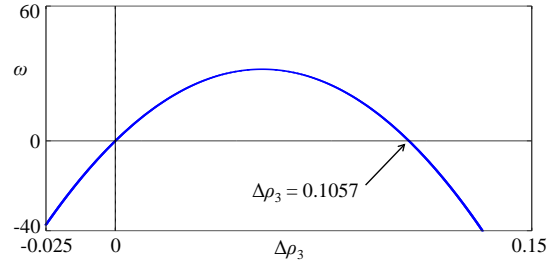


Figura 3: Variación de ω en función de $\Delta \rho_3$.

Por tanto, si partimos del valor no-genérico de ρ_3 y decrementamos ligeramente este parámetro geométrico, la singularidad aislada \mathbf{y}_0 se transforma en una pequeña elipse E_r en el plano (θ_3, ϕ) . Si, partiendo de $\Delta \rho_3 < 0$, incrementamos de forma continua ρ_3 haciendo tender $\Delta \rho_3$ a cero por la izquierda, el tamaño de E_r disminuye continuamente, hasta que esta pequeña elipse real degenera de nuevo en el punto \mathbf{y}_0 . Si la perturbación $\Delta \rho_3$ sigue incrementándose y se torna positiva, entonces el punto \mathbf{y}_0 se transforma en una elipse imaginaria, es decir, \mathbf{y}_0 desaparece del plano (θ_3, ϕ) .

La Figura 4a ilustra la transformación de \mathbf{y}_0 en una curva cerrada E_r aproximadamente elíptica, para la perturbación $\Delta \rho_3 = -0.00001$: la elipse definida por la ecuación (7) se representa mediante trazo punteado de color rojo, mientras que el lugar de las singularidades exacto [es decir, la curva definida por la ecuación (11)] se representa mediante trazo continuo de color azul. Nótese que la ecuación (7) es una precisa aproximación del lugar de las singularidades exacto para perturbaciones suficientemente pequeñas, mientras que para perturbaciones mayores dicha aproximación no es buena (por ejemplo, véase la Figura 4b, en la que $\Delta \rho_3 = -0.005$).

Resolviendo la cinemática inversa de este robot [es decir, resolviendo ρ_1 y ρ_2 de las ecuaciones (9) y (10) a partir de θ_3 y ϕ], es posible transformar la elipse real E_r al plano de entrada. La imagen de la elipse E_r en el plano de entrada es una pequeña curva cerrada con dos cúspides (véase la Figura 5). Es bien sabido que dichas cúspides permiten al robot reconfigurarse entre distintos modos de ensamblado sin cruzar singularidades. Por tanto, la destrucción de la elipse real E_r (cuando $\omega > 0$) provoca la destrucción de dichas cúspides, de manera que el robot pierde la anterior habilidad (reconfigurarse sin cruzar singularidades) en la región del plano (ρ_1, ρ_2) cercana a la curva cerrada bicúspide de la Figura 5 (aunque, como se observa en dicha figura, el lugar de las singularidades de este robot exhibe otras cúspides que no son destruidas junto con E_r y que siguen posibilitando reconfiguraciones no-singulares).

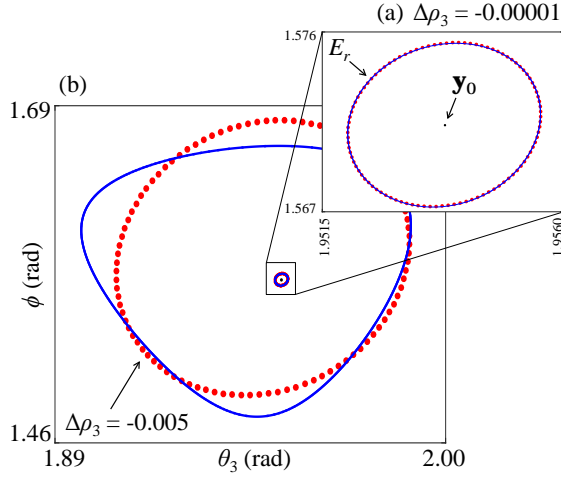


Figura 4: Cuando ρ_3 disminuye ligeramente, el punto aislado y_0 se transforma en una curva cerrada que puede aproximarse por una elipse.

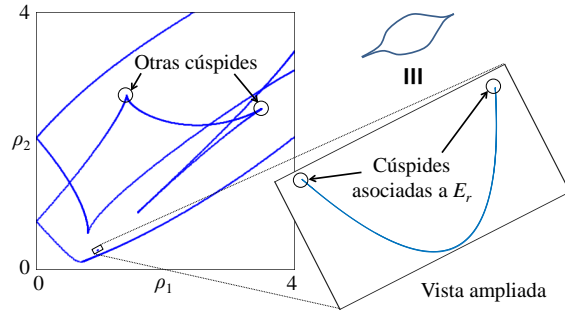


Figura 5: Lugar de las singularidades del robot 3RPR con $\Delta\rho_3 = -0.00001$. Se muestra una vista ampliada de la curva cerrada bicúspide que es la imagen de la elipse real E_r de la Figura 4a en el plano (ρ_1, ρ_2) .

Nótese que, según la Figura 3, ω se vuelve de nuevo negativa para $\Delta\rho_3 > 0.1057$, lo que implica que la elipse real E_r definida por la ecuación (7) reaparece de nuevo para $\Delta\rho_3 > 0.1057$. Esto podría llevar a pensar, erróneamente, que el lugar de las singularidades exacto [definido por la ecuación (11)] también debería exhibir una pequeña curva cerrada (de forma aproximadamente elíptica) en el plano (θ_3, ϕ) para $\Delta\rho_3 > 0.1057$, a causa de la reaparición de la elipse real E_r . Sin embargo, esto no es cierto ya que la perturbación $\Delta\rho_3 = 0.1057$ es demasiado grande para que la ecuación (7) siga siendo una aproximación válida del lugar de las singularidades exacto. Por tanto, el análisis del signo de ω en la ecuación (15) únicamente es válido para valores suficientemente pequeños de $|\Delta\rho_3|$.

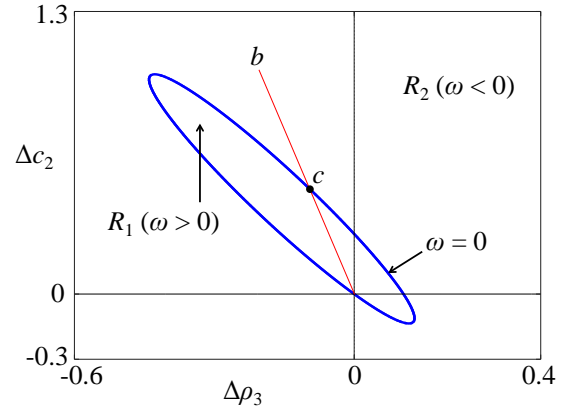


Figura 6: Variación del signo de ω en función de las perturbaciones $\Delta\rho_3$ y Δc_2 .

3.2. PERTURBACIÓN DE DOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

A continuación, considérese que ρ_3 y c_2 son perturbados, es decir: $\Delta\mathbf{g} = [\Delta c_2, 0, 0, 0, 0, 0, \Delta\rho_3]^T$. En tal caso, la expresión de ω es:

$$\begin{aligned} \omega = & -2811.780\Delta c_2^2 - 10847.38\Delta c_2\Delta\rho_3 \\ & + 777.4378\Delta c_2 - 11406.38\Delta\rho_3^2 + 1206.22\Delta\rho_3 \end{aligned} \quad (16)$$

La Figura 6 muestra cómo varía el signo de ω en función de las perturbaciones $\Delta\rho_3$ y Δc_2 . El plano $(\Delta\rho_3, \Delta c_2)$ queda dividido en dos regiones por la elipse definida por $\omega = 0$: una región R_1 interior a esta elipse, y otra región R_2 exterior a ella. Dado que $\omega < 0$ en la región R_2 , para perturbaciones pertenecientes a la región exterior la ecuación (7) define una elipse real. Es decir, para $(\Delta\rho_3, \Delta c_2) \in R_2$, el punto aislado y_0 se deforma en una curva cerrada con forma aproximadamente elíptica, y ésta se transforma en una curva bicúspide cuando se transforma al plano (ρ_1, ρ_2) .

Para perturbaciones pertenecientes a la región R_1 se tiene que $\omega > 0$, luego la ecuación (7) define una elipse imaginaria. Esto significa que el punto y_0 desaparece, y el robot pierde la habilidad de reconfigurarse entre distintas soluciones del problema cinemático directo sin cruzar singularidades. La pérdida de esta habilidad es únicamente local, ya que, como muestra la Figura 5, el lugar de las singularidades de este robot exhibe otras cúspides que no se destruyen junto con y_0 .

Finalmente, es importante recalcar de nuevo que el comportamiento del lugar de las singularidades exacto [definido por la ecuación (11)] ante perturbaciones grandes no puede predecirse analizando las transformaciones sufridas por la elipse definida por la ecuación (7). Por ejemplo, si partimos

de la geometría no-genérica \mathbf{g}_0 (es decir, del origen $\Delta\rho_3 = \Delta c_2 = 0$) y perturbamos estos dos parámetros geométricos a lo largo del segmento b (véase la Figura 6), al atravesar el punto c (al pasar de la región R_1 a la región R_2) no observaremos la aparición de ninguna curva cerrada (con forma aproximadamente elíptica) en el lugar de las singularidades exacto, a pesar de que la elipse definida por la ecuación (7) pasa de imaginaria a real. Esto se debe a que cruzar el punto c requiere perturbaciones tan grandes que invalidan la aproximación cuadrática de la ecuación (7).

4. EJEMPLO 2: ROBOT 2RPR-PR

En esta sección se aplicará el método propuesto para analizar la estabilidad de las singularidades aisladas del robot 2RPR-PR, mostrado en la Figura 7. Este robot puede obtenerse bloqueando la orientación de la pata central del robot 3RPR mostrado en la Figura 1, de manera que la longitud de dicha pata central deja de ser una variable articular controlada y pasa a ser una variable pasiva. Aunque el robot de la Figura 7 puede obtenerse como caso particular del robot de la Figura 1, en este artículo no se ha empleado la misma notación para denotar las variables cinemáticas comunes a ambos robots, ya que se ha preferido respetar la notación empleada en [6] para el robot 2RPR-PR.

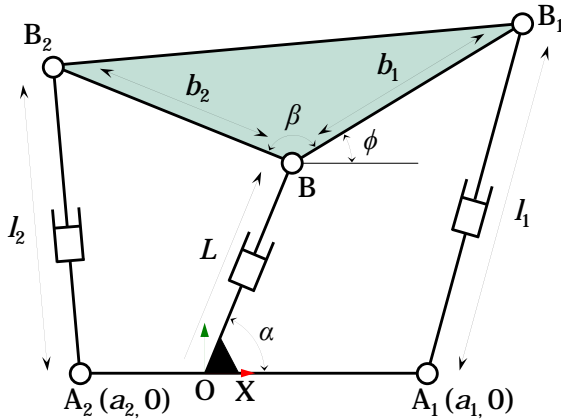


Figura 7: Robot paralelo 2RPR-PR.

El robot 2RPR-PR es un robot de 2 GDL en el que se emplean dos actuadores lineales A_1B_1 y A_2B_2 (con longitudes l_1 y l_2 , respectivamente) para controlar la posición y orientación de la plataforma móvil triangular BB_1B_2 . La articulación B está conectada a una guía o pata pasiva OB que forma un ángulo fijo α con el segmento A_2A_1 , de manera que la posición de la plataforma móvil queda totalmente definida por la posición L de la articulación B a lo largo de dicha guía. La orientación de la plataforma móvil está definida por ϕ .

La cinemática de este mecanismo paralelo de 2 GDL fue estudiada en [11], donde se proponía un robot articulado de tipo serpiente formado por varios mecanismos 2RPR-PR conectados en serie. En [10] se presentó un robot trepador para inspeccionar estructuras verticales; dicho robot estaba formado también por la combinación serie de 4 mecanismos paralelos de tipo 2RPR-PR. En [8] se presentó una herramienta gráfica para simular la cinemática y el control dinámico de este mecanismo paralelo. En [6] se analizó en detalle el problema cinemático directo de este mecanismo paralelo, poniendo especial énfasis en diseños geométricos no-genéricos para los que dicho problema se simplifica y admite solución analítica.

En [7] se estudiaron en detalle las singularidades y la multiplicidad de las soluciones del problema cinemático directo de uno de los diseños no-genéricos analizados en [6], caracterizado por $\alpha = \pi/2$ rad y $\beta = \pi$ rad. Tal diseño no-genérico implica que la guía pasiva OB es perpendicular al segmento A_2A_1 , y que las tres articulaciones BB_1B_2 están alineadas. En [7] se demostró que el lugar de las singularidades de dicho diseño no-genérico exhibe un punto aislado λ_π que, al rodearlo en el plano (l_1, l_2) , permite al robot reconfigurarse entre distintos modos de ensamblado sin cruzar singularidades. Aunque este fenómeno parecía ocurrir en ausencia de cúspides, en [3] se perturbó ligeramente este diseño no-genérico para demostrar que el punto aislado λ_π es en realidad una deltoide (curva cerrada con tres cúspides) degenerada en un punto, de manera que rodear el punto λ_π equivale a rodear tres cúspides “ocultas”.

A continuación, se aplicará el método propuesto en el presente artículo para analizar la estabilidad de la singularidad aislada mencionada en el párrafo anterior. Para el robot de la Figura 7, las variables de entrada son las longitudes articulares: $\mathbf{x} = [l_1, l_2]^T$, mientras que las variables de salida son la posición y orientación de la plataforma móvil: $\mathbf{y} = [L, \phi]^T$. Los parámetros geométricos son: $\mathbf{g} = [a_1, a_2, b_1, b_2, \alpha, \beta]^T$. Las funciones de restricción se obtienen de nuevo imponiendo la condición de que los actuadores lineales A_1B_1 y A_2B_2 tengan longitudes l_1 y l_2 , respectivamente:

$$f_1 = \left\| \begin{bmatrix} L \cos \alpha + b_1 \cos \phi - a_1 \\ L \sin \alpha + b_1 \sin \phi \end{bmatrix} \right\|^2 - l_1^2 \quad (17)$$

$$f_2 = \left\| \begin{bmatrix} L \cos \alpha + b_2 \cos(\phi + \beta) - a_2 \\ L \sin \alpha + b_2 \sin(\phi + \beta) \end{bmatrix} \right\|^2 - l_2^2 \quad (18)$$

El lugar de las singularidades de este robot está definido en el plano (L, ϕ) por la ecuación:

$$S(\mathbf{y}, \mathbf{g}) = \frac{\partial f_1}{\partial L} \frac{\partial f_2}{\partial \phi} - \frac{\partial f_1}{\partial \phi} \frac{\partial f_2}{\partial L} = 0 \quad (19)$$

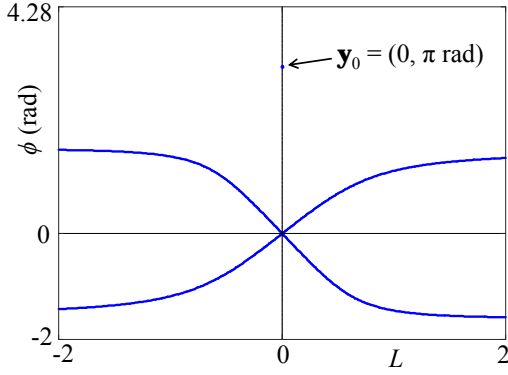


Figura 8: Lugar de las singularidades de un robot 2RPR-PR no-genérico.

A continuación se analizará el lugar de las singularidades de la geometría no-genérica estudiada en [7, 3], que está definida por: $\mathbf{g}_0 = [0.3, -0.7, 0.6, 0.5, \pi/2 \text{ rad}, \pi \text{ rad}]^T$. Como se ha indicado anteriormente, esta geometría implica que la guía pasiva OB es perpendicular a A_2A_1 , y que las tres articulaciones BB_1B_2 están alineadas.

La Figura 8 representa el lugar de las singularidades en el plano (L, ϕ) para la geometría no-genérica \mathbf{g}_0 indicada en el párrafo previo. Dicho lugar de las singularidades exhibe un punto aislado $\mathbf{y}_0 = [0, \pi \text{ rad}]^T$. Seguidamente, se aplicará el análisis presentado en la Sección 2 para estudiar la estabilidad de esta singularidad aislada. Asíumase que todos los parámetros geométricos se desvían ligeramente de \mathbf{g}_0 , es decir: $\Delta \mathbf{g} = [\Delta a_1, \Delta a_2, \Delta b_1, \Delta b_2, \Delta \alpha, \Delta \beta]^T$. Sustituyendo \mathbf{y}_0 y \mathbf{g}_0 en la ecuación (7), la cual es una aproximación del lugar de las singularidades en el plano (L, ϕ) en la vecindad de \mathbf{y}_0 , resulta en:

$$\frac{\mathbf{H}_{11}}{2} = \begin{bmatrix} 4.4 & -0.34 \\ -0.34 & 1.2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{K} = [-0.54\Delta\alpha - 0.1\Delta\beta, 0.6\Delta\beta - 1.062\Delta\alpha]^T \quad (21)$$

$$u = -1.26\Delta\alpha\Delta\beta \quad (22)$$

Nótese que, a pesar de que se han perturbado todos los parámetros geométricos, según las ecuaciones (21) y (22), la transformación de la singularidad aislada \mathbf{y}_0 únicamente depende de las perturbaciones en α y β . Éstos son, precisamente, los únicos dos parámetros geométricos que determinan si \mathbf{g}_0 es una geometría genérica o no, como ya se ha explicado anteriormente. Esto contrasta con el ejemplo de la Sección 3, donde la transformación sufrida por la singularidad aislada dependía de las perturbaciones en todos los parámetros geométricos del robot [véanse las ecuaciones (13) y (14)].

Dado que $\det(\mathbf{H}_{11}) > 0$, la ecuación (7) define una elipse real o imaginaria, en función del signo

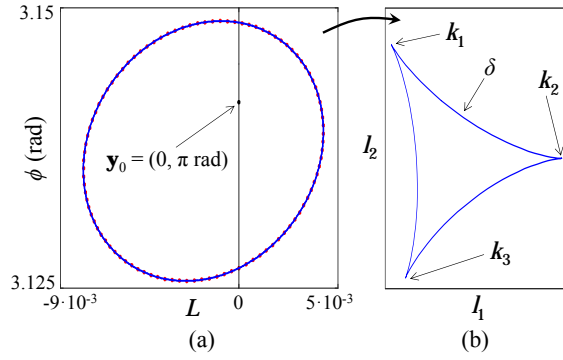


Figura 9: (a) Lugar de las singularidades aproximadamente elíptico cerca de \mathbf{y}_0 , para $\Delta\alpha = \Delta\beta = -0.01 \text{ rad}$. (b) La imagen de esta elipse en el plano (l_1, l_2) es una deltoide con cúspides $k_1 \approx (0.89996, 1.20002)$, $k_2 \approx (0.90009, 1.19996)$, y $k_3 \approx (0.89997, 1.19990)$.

de $\omega = c_{11}\det(\mathbf{C})$:

$$\omega = -0.228096(110\Delta\alpha^2 + 17\Delta\alpha\Delta\beta + 30\Delta\beta^2) \quad (23)$$

ω en la ecuación (23) es una forma cuadrática definida negativa, es decir, $\omega < 0 \forall (\Delta\alpha, \Delta\beta) \neq (0, 0)$. Por tanto, si cualquiera de los dos parámetros geométricos $\{\alpha, \beta\}$ se desvía de su valor no-genérico, entonces la ecuación (7) define una elipse real en el plano (L, ϕ) , independientemente de la dirección de dichas perturbaciones. Esto significa que el punto aislado \mathbf{y}_0 del lugar de las singularidades exacto *siempre* se deforma en una pequeña curva cerrada que puede aproximarse por una elipse si las perturbaciones son suficientemente pequeñas.

Si dicha elipse se transforma al plano (l_1, l_2) , ésta se convierte en una deltoide δ , que es una curva cerrada que exhibe tres cúspides (véase el ejemplo de la Figura 9). Como ya se ha comentado con anterioridad, esta deltoide permite a este robot modificar su modo de ensamblado sin atravesar singularidades si se rodea cualquiera de sus cúspides en el plano (l_1, l_2) . Si se rodea la deltoide entera (es decir, sus tres cúspides simultáneamente), se produce un efecto similar [3].

Comparando el análisis presentado en esta sección con el de la Sección 3, se observa claramente la diferencia de estabilidad entre las singularidades aisladas estudiadas en ambas secciones. Mientras que la singularidad aislada analizada en la Sección 3 (singularidad tipo *lips*) puede destruirse aplicando las perturbaciones apropiadas (es decir, aquellas perturbaciones que hacen $\omega > 0$), provocando la destrucción de dos cúspides, la singularidad aislada estudiada en la presente sección no puede destruirse, ya que cualquier perturbación *siempre* la transforma en una pequeña elipse cuya imagen en

el plano de entrada es una deltoide. Esto ilustra el hecho de que la deltoide es una singularidad estable obtenida al perturbar una singularidad aislada de multiplicidad 4 [3], que es el caso de la singularidad aislada analizada en la presente sección.

5. CONCLUSIONES

En este artículo hemos presentado un método para determinar cómo se transforman las singularidades aisladas de robots paralelos cuando los parámetros geométricos del robot se desvían ligeramente de diseños no-genéricos. El método propuesto consiste en aproximar el lugar de las singularidades por una curva cónica, para clasificar dicha cónica en función de las perturbaciones de los diferentes parámetros geométricos del robot. Este método ha sido ilustrado mediante dos robots paralelos que poseen singularidades aisladas.

En el futuro, extenderemos este análisis a otras singularidades de orden superior distintas a las singularidades aisladas [13], así como a robots con más de 2 GDL. Además, también exploraremos la aplicación práctica del método propuesto en el diseño robusto de robots paralelos cuspidales.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los Ministerios de Educación (ayuda FPU13/00413) y Economía (proyecto DPI 2016-78361-R).

Referencias

- [1] Caro S., Wenger P., and Chablat D. Non-singular assembly mode changing trajectories of a 6-DOF parallel robot. In *ASME 2012 IDETC/CIE Conference*, pp. 1245–1254, 2012.
- [2] Coste M., Chablat D., and Wenger P. *New Trends in Mechanism and Machine Science*, chapter Perturbation of Symmetric 3-RPR Manipulators and Asymptotic Singularities, pp. 23–31. Springer Netherlands, 2013.
- [3] Coste M., Wenger P., and Chablat D. Hidden cusps. In *15th International Symposium on Advances in Robot Kinematics*, 2016.
- [4] DallaLibera F. and Ishiguro H. Non-singular transitions between assembly modes of 2-DOF planar parallel manipulators with a passive leg. *Mech. Mach. Theory*, 77:182–197, 2014.
- [5] Husty M., Schadlbauer J., Caro S., and Wenger P. The 3-RPS manipulator can have non-singular assembly-mode changes. In Thomas F. and Pérez Gracia A., editors, *Computational Kinematics: Proceedings of the 6th International Workshop on Computational Kinematics (CK2013)*, pp. 339–348. Springer Netherlands, 2014.
- [6] Kong X. and Gosselin C. M. Generation and forward displacement analysis of RPR-PR-RPR analytic planar parallel manipulators. *J. Mech. Design*, 124(2):294–300, 2002.
- [7] Peidró A., Marín J.M., Gil A., and Reinoso O. Performing nonsingular transitions between assembly modes in analytic parallel manipulators by enclosing quadruple solutions. *J. Mech. Design*, 137(12):122302, 2015.
- [8] Peidró A., Reinoso Ó., Gil A., Marín J. M., and Payá L. A simulation tool to study the kinematics and control of 2RPR-PR parallel robots. *IFAC-PapersOnLine*, 49(6):268 – 273, 2016.
- [9] Peidró A., Reinoso O., Gil A., Marín J.M., and Payá L. A virtual laboratory to simulate the control of parallel robots. *IFAC-PapersOnLine*, 48(29):19–24, 2015.
- [10] Peidró A., Reinoso Ó., Payá L., Berenguer Y., Gil A., and Marín J.M. Análisis cinemático y simulación de un robot trepador con arquitectura serie-paralela. In *Actas de las XXXVI Jornadas de Automática*, pp. 400–407, 2015.
- [11] Ridgeway S.C., Crane C.D., and Duffy J. A forward analysis of a two degree of freedom parallel manipulator. In Lenarčič J. and Parenti-Castelli V., editors, *Recent Advances in Robot Kinematics*, pp. 431–440. Springer Netherlands, 1996.
- [12] Srinivasan Vijay. *Theory of Dimensioning: An Introduction to Parameterizing Geometric Models*. CRC Press, 2003.
- [13] Thomas F. and Wenger P. On the topological characterization of robot singularity loci. a catastrophe-theoretic approach. In *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3940–3945, May 2011.
- [14] Urizar M., Petuya V., Altuzarra O., and Hernández A. Assembly mode changing in the cuspidal analytic 3-RPR. *IEEE Trans. Robot.*, 28(2):506–513, 2012.
- [15] Zein M., Wenger P., and Chablat D. Non-singular assembly-mode changing motions for 3-RPR parallel manipulators. *Mech. Mach. Theory*, 43(4):480–490, 2008.

INTERFAZ DE CONTROL PARA UN ROBOT MANIPULADOR MEDIANTE REALIDAD VIRTUAL

Elena Peña-Tapia, Juan Jesús Roldán, Mario Garzón, Andrés Martín-Barrio y Antonio Barrientos

Centro de Automática y Robótica (UPM-CSIC), Universidad Politécnica de Madrid

c/ José Gutiérrez Abascal, nº2, 28006 Madrid

elena.ptapia@alumnos.upm.es, jj.rolan@upm.es, ma.garzon@upm.es, andres.mb@upm.es, antonio.barrientos@upm.es

Resumen

Las tecnologías inmersivas como la Realidad Virtual tienen potencial para mejorar la teleoperación de los robots. Estas tecnologías transportan al operador al espacio de trabajo, le proporcionan información sobre la misión y le permiten comandar los robots de manera intuitiva. En este trabajo se ha integrado un robot manipulador Kinova Jaco² en un entorno de realidad virtual visualizado con las gafas de realidad virtual HTC Vive. La interfaz permite tanto la monitorización del brazo robótico (estado de las articulaciones, localización del efector, acciones sobre su entorno...) como el comando del mismo (mediante el envío de metas al efector). Además, el trabajo aborda con éxito la conexión entre el mundo de los robots, dominado por Robot Operating System (ROS), y el mundo de la realidad virtual, recreado mediante Unity y Steam VR. Las primeras pruebas con operadores muestran el potencial de esta interfaz: la transmisión de información espacial, el sistema de comando intuitivo y la operación en condiciones de seguridad. En trabajos futuros se abordará la integración de información sobre el entorno obtenida mediante cámaras 3D, así como la visualización de las trayectorias del robot manipulador hacia sus metas.

Palabras clave: Robótica, Robot Manipulador, Interfaz, Realidad Virtual.

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En los últimos años las misiones robóticas han experimentado un gran desarrollo y se han aplicado en múltiples campos como la protección de infraestructuras [4], monitorización ambiental [11], etc. Estas misiones presentan dificultades ligadas a la utilización de múltiples robots, la realización de tareas complejas o el despliegue en escenarios desestructurados.

Algunos de los problemas de factores humanos en las misiones robóticas son el exceso de carga de trabajo, la falta de conciencia de situación, un in-

adecuado nivel de estrés que pueda dar lugar a estados de ansiedad o aburrimiento y una falta o exceso de confianza en la automatización. Estos problemas pueden provocar que las decisiones del operador sean incorrectas y sus acciones de control provoquen desde pérdidas de eficiencia hasta accidentes con los robots.

Estos retos pueden ser abordados mediante el desarrollo de interfaces que asuman algunas funciones del operador, transmitan la información adecuada de la forma adecuada, mantengan su atención durante la misión y favorezcan la toma de decisiones. En particular, estas interfaces exploran posibilidades como las interacciones multimodales, las tecnologías inmersivas, los componentes predictivos y los paneles adaptativos.

En este trabajo se ha desarrollado una interfaz mediante realidad virtual para la monitorización y el control de un robot manipulador. Esta interfaz emplea tecnologías inmersivas (realidad virtual) para introducir al operador en el entorno de trabajo y mejorar su percepción sobre las acciones del robot, así como interacciones multimodales (mandos con vibración) para reforzar la información visual y facilitar el comando del robot.

El resto de esta comunicación está organizada de la siguiente manera: La sección 2 recopila algunos desarrollos actuales de interfaces inmersivas para misiones robóticas. La sección 3 presenta el sistema formado por el robot manipulador y la interfaz en realidad virtual. La sección 4 describe el robot manipulador, así como su sistema de planificación y control de trayectorias. La sección 5 describe la interfaz de realidad virtual y aborda tanto la visualización de la información como la generación de los comandos. Por último, la sección 6 resume los principales resultados del trabajo y las posibles continuaciones del mismo.

2 ESTADO DEL ARTE

Las interfaces de operador para robots deben integrar estas informaciones [1]: las medidas de los sensores de los robots, los comandos enviados a los robots, el estado actual de los robots (por ejemplo, el nivel de batería), el estado actual de las tareas

(por ejemplo, el porcentaje de realización) y los mapas necesarios para la navegación.

El rendimiento de estas interfaces puede verse afectado por los problemas que se presentan en la tabla 1. Factores como la limitación del campo visual, la pérdida de la orientación o la degradación de la percepción de la profundidad han de tenerse en cuenta en su diseño. El desarrollo de interfaces inmersivas es una de las estrategias más prometedoras para abordar estos problemas.

Tabla 1: Problemas en la teleoperación.

Problema	Posible solución
Limitación del campo visual	Inmersión
Desorientación	Múltiples cámaras
Pérdida del contexto	Mapas
Degradación de la profundidad	Inmersión
Retardo en las comunicaciones	Predicción
	Adaptación

A día de hoy existen tres tipos de tecnologías inmersivas: la realidad aumentada (RA), la realidad virtual (RV) y la realidad mixta (RM).

La realidad aumentada superpone elementos virtuales sobre los vídeos de los robots. Estos elementos virtuales pueden incluir mapas, elevación del terreno, obstáculos, rutas de los robots, posiciones de los objetivos y otros datos relevantes. La literatura contiene ejemplos de interfaces de realidad aumentada para robots manipuladores [5], robots quirúrgicos [15] y flotas con múltiples robots [6].

La realidad virtual recrea escenarios combinando representaciones de elementos reales (por ejemplo, robots y obstáculos) y elementos virtuales (por ejemplo, rutas y objetivos). En la literatura se pueden encontrar desarrollos de interfaces de realidad virtual para robots móviles [9] y manipuladores industriales [10]. Algunos estudios empiezan a demostrar el potencial de estas interfaces para mejorar la conciencia de la situación de los operadores sin incrementar sustancialmente su carga de trabajo [12].

Por último, la realidad mixta combina aumentada y virtual, generando escenarios en los que los operadores pueden interactuar con objetos tanto reales como virtuales. Esta tecnología es reciente y apenas se ha implementado en interfaces, pero existe algún desarrollo para robots industriales [3] y móviles [7].



Figura 2: Brazo robótico Jaco² de Kinova.

3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

La integración del robot manipulador en la realidad virtual requiere la conexión entre el mundo real y el mundo virtual, tal y como se muestra en la figura 1. El mundo real (descrito en la sección 4) está formado por el robot manipulador y su espacio de trabajo y está dominado por *Robot Operating System (ROS)*, dado que este sistema se emplea tanto para la planificación como para el control de este robot. Por su parte, el mundo virtual (descrito en la sección 5) contiene la interfaz de operador y está controlado por *Unity* y *Steam VR*, ya que estas herramientas son utilizadas para la reproducción y la visualización de la realidad virtual.

4 ROBOT MANIPULADOR

Para el desarrollo de este trabajo se ha utilizado un robot manipulador Jaco² fabricado por *Kinova Robotics*. Se trata de un brazo robótico de seis grados de libertad que incluye un efector final formado por tres dedos plásticos flexibles. Soporta una carga de peso de 1,6 kg y consigue un alcance de 900 mm. Este brazo permite también realizar control de fuerza, haciendo que sea seguro para trabajar de forma colaborativa con personas. El robot manipulador formado por el brazo y su efector pueden observarse en la figura 2.

El control del robot se realiza a través de una conexión USB o Ethernet entre un ordenador, en el que se ejecuta la planificación de trayectorias y demás tareas de alto nivel, y un controlador embebido en el brazo, en el que se ejecuta el control de las articulaciones y, en caso de ser necesaria, la cinemática inversa.

La planificación de los movimientos del brazo utiliza como herramienta principal la *Open Motion Planning Library (OMPL)* [13], que es una librería

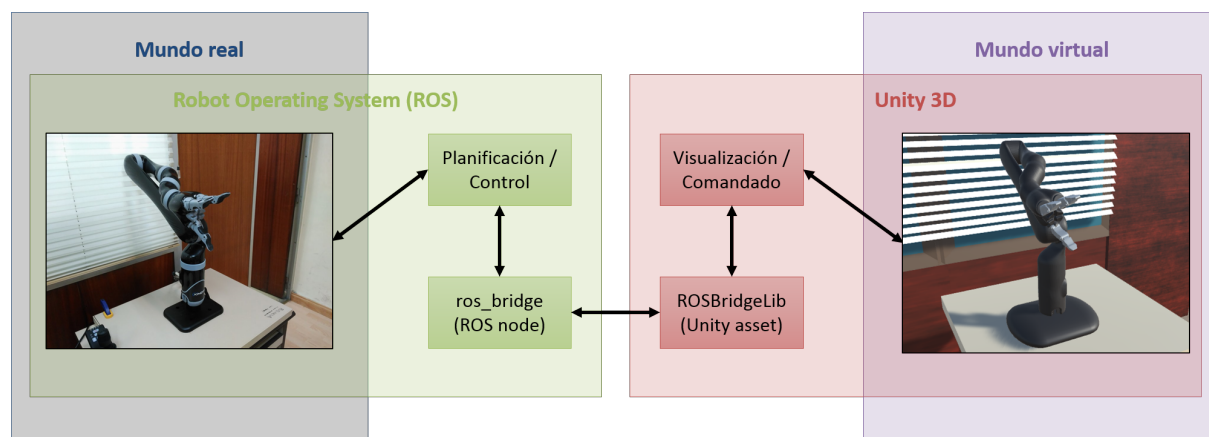


Figura 1: Esquema del sistema formado por el robot manipulador y la realidad virtual.

de código abierto que implementa varios algoritmos de planificación basados en muestreo: algunos ejemplos son PRM, RRT, EST, SBL, KPIECE y SyCLOP. Esta librería está integrada en el software de manipulación móvil *MoveIt!*, que provee funcionalidades cinemáticas como la comprobación de colisiones, la percepción 3D y otras herramientas.

Para los experimentos realizados, se utilizó el planificador *RRT-connect* [8]. Primero, este planificador obtiene un estado aleatorio q_r en el espacio articular. Luego busca entre los estados previamente observados el más cercano a q_r y lo denota como q_c . Finalmente expande el árbol, teniendo en cuenta las capacidades cinemáticas del robot, desde el estado q_c en dirección a q_r hasta llegar a un estado válido q_m , el cual es añadido al árbol de exploración. La figura 3 muestra un caso de uso de esta herramienta en el que el robot manipulador alcanza las metas enviadas desde la realidad virtual.

La configuración del robot en *MoveIt!* se realiza mediante un fichero Unified Robot Description Format (URDF), que utiliza un formato XML para representar el modelo del robot, sus sensores y la escena en la que se encuentra. El modelo utilizado parte de un fichero básico proporcionado por el fabricante, al cual se agrega la descripción de la escena y los sensores adicionales que se utilizan. A partir de este modelo URDF, *MoveIt!* obtiene la información necesaria para el verificador de colisiones y los demás elementos necesarios para la planificación del movimiento.

Una vez realizada la configuración inicial, *MoveIt!* se comunica con el driver del robot para obtener la posición de cada articulación y demás parámetros necesarios para conocer el estado actual del robot. La configuración final o la posición del robot puede ser enviada a *MoveIt!* mediante una interfaz de

control o a través de un mensaje de *ROS*. Una vez recibida la meta, se realiza la planificación y se obtiene la trayectoria de cada articulación, que es enviada de vuelta al driver del robot, que se encarga de comunicarse con el brazo y controlar los movimientos del mismo.

Para poder controlar el manipulador desde la interfaz de realidad virtual es necesario establecer una comunicación bidireccional entre el entorno *Unity* y los componentes de software del robot, los cuales trabajan bajo *ROS*. Para esto se utiliza el componente *RosBridge*¹, que permite comunicar nodos de *ROS* con programas externos, convirtiendo los mensajes estándar de *ROS* en mensajes JSON, que pueden ser enviados a través de una interfaz web. *RosBridge* establece un protocolo para el establecimiento de las comunicaciones, es decir, para suscribirse o publicar en un tópico de *ROS*. Además, este paquete posee una implementación que permite el envío de mensajes utilizando web-sockets.

Como se mencionó anteriormente, la comunicación entre *RosBridge* y *Unity* es bidireccional. *RosBridge* recibe de *Unity* los mensajes de control, formados por comandos de movimiento y otras señales que controlan la ejecución de la misión. Por otra parte, *RosBridge* envía de vuelta el estado del robot, que consiste en la posición de cada una de las articulaciones, y en caso de estar disponibles, las medidas de los sensores y cualquier otra información que permita al operador tener un conocimiento adecuado de la situación.

La figura 4 muestra un esquema general de las comunicaciones entre el robot y *Unity*. Como se puede observar, una vez recibidos los comandos desde *RosBridge*, un nodo intermedio se encarga de procesarlos y convertirlos en mensajes que pueden ser interpretados como órdenes de con-

¹http://wiki.ros.org/rosbridge_suite

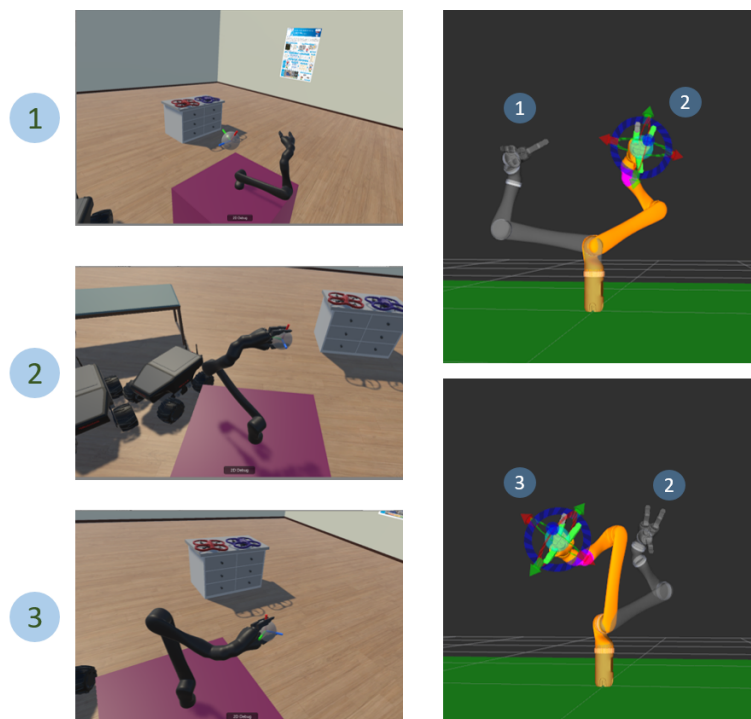


Figura 3: Planificación de los movimientos del robot manipulador.

trol válidas para *MoveIt!*, este nodo envía también las señales necesarias para iniciar, detener o reiniciar el movimiento del brazo. *MoveIt!* procesa estos mensajes, realiza la planificación de movimientos y envía las trayectorias articulares al controlador del robot. Este último se encarga de la comunicación con el controlador embebido del robot y envía de vuelta mensajes con el estado de las articulaciones. *RosBridge* envía este mensaje directamente a *Unity*, donde se procesa para ser presentado al operador.

5 REALIDAD VIRTUAL

Para el desarrollo de la interfaz por realidad virtual se ha utilizado el entorno *Unity* y para su visualización se han empleado las gafas de realidad virtual *HTC Vive* y el programa *Steam VR*. *Unity* es un entorno de desarrollo de videojuegos que proporciona multitud de recursos como escenarios realistas, modelos dinámicos y cinemáticos, personajes con inteligencia artificial, etc. El conjunto *HTC Vive* incluye un casco con gafas de realidad virtual y auriculares, dos controladores con botones y vibración y dos estaciones base para posicionar estos elementos en la habitación. Por último, *Steam VR* es un complemento para *Unity* necesario para compilar y ejecutar los programas en la realidad virtual.

El modelo del robot se ha introducido en *Unity* descompuesto en ocho eslabones: base, hombro,

brazo, antebrazo, muñeca 1, muñeca 2, mano y dedos. Cada eslabón se ha implementado mediante dos objetos: uno para ensamblarlo con el anterior con la posición y la orientación adecuadas y otro para permitir el movimiento de su articulación. El resultado es un robot virtual con posiciones y movimientos que coinciden con los del robot real.

Además, se han diseñado dos escenarios para el robot manipulador: uno para pruebas en el que el robot virtual se encuentra en un escenario vacío y otro para demostraciones que reproduce el laboratorio del robot real. La herramienta *Unity* y, sobre todo, la amplia gama de recursos disponibles en internet permite el modelado de todo tipo de escenarios interiores o exteriores: por ejemplo, casas, oficinas, industrias, cultivos, bosques...

Para el comando del manipulador se plantearon varios sistemas intuitivos y finalmente se optó por una esfera con tres ejes. La esfera representa la posición que tiene que alcanzar el efector del robot, mientras que los tres ejes definen la orientación que debe adquirir el mismo. Cuando la esfera está en el efector, el robot permanece en reposo. En cualquier momento, el operador puede agarrar la esfera, desplazarla por la escena y soltarla en otra localización. Cuando el operador suelta la esfera, el robot se desplaza hasta esta localización.

Además, se ha introducido un sistema de teletransporte que permite al operador escoger el

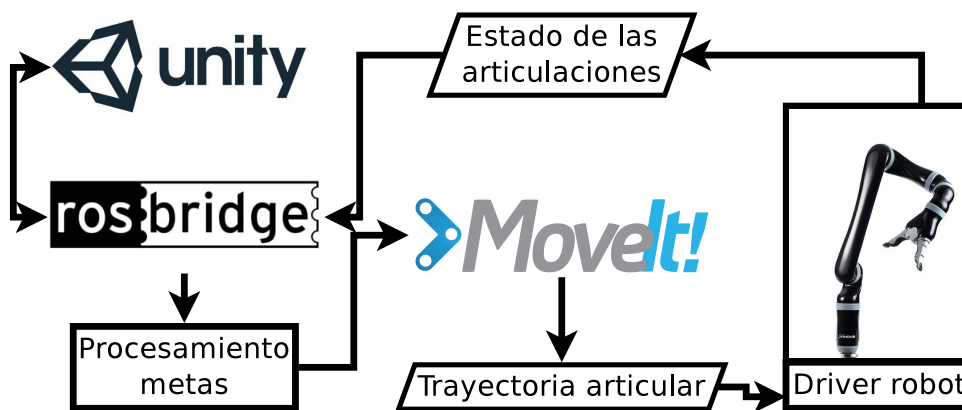


Figura 4: Esquema de comunicaciones del robot con el entorno *Unity*.

punto de vista desde el que observar la escena y comandar el robot. Para teletransportarse, el usuario sólo tiene que presionar un botón en el mando y dirigir la parábola hacia el punto deseado del suelo (ver figura 5). Este sistema es especialmente útil para tener una visión adecuada de las tareas de manipulación y enviar las metas del efector de forma precisa.

En el comando del manipulador intervienen varios scripts. El primero de ellos (*Interactable*) se desarrolló tomando como base un ejemplo de *Steam VR* y controla los movimientos de la esfera de comando, permitiendo al usuario cogerla, desplazarla y soltarla. El resto de los scripts pertenecen a la librería *ROSBridgeLib* [2] y han sido adaptados para trabajar con los mensajes que emplea el robot manipulador.

El script *RealSenseViewer* establece la comunicación por socket con el paquete *RosBridge* y crea los suscriptores y publicadores pertinentes. En este caso, el programa desarrollado en *Unity* se suscribe a un mensaje con las posiciones de las articulaciones (*sensor_msgs/JointState*) y publica otro mensaje con las metas para el efector (*geometry_msgs/Pose*).

Cada mensaje que se desee intercambiar entre *Unity* y *ROS* se debe implementar mediante dos scripts. El primero tiene que definir la estructura del mensaje, proporcionar constructores a partir de un *JSONNode* (mensaje recibido por el socket) y de cada una de las variables del mensaje y proporcionar métodos para acceder a dichas variables. El segundo se ocupa de establecer el tipo de mensaje y el tópico en el que se debe recibir.

6 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados de las primeras pruebas con operadores indican que la interfaz aporta beneficios

relacionados con el conocimiento de la situación y el comando intuitivo del robot. Los operadores valoran positivamente la libertad para elegir el punto de vista desde el que observan el robot, así como la facilidad de comandar el robot moviendo la meta de su efector.

En trabajos futuros se reforzará la información visual del robot y su entorno, mostrando el espacio de trabajo, la manipulabilidad y las trayectorias planificadas. Además, se prevé el desarrollo de un método de comando directo que permita modificar una a una las orientaciones de las articulaciones. Por último, se estudiará el modelado automático del entorno del robot, empleando cámaras 3D y mostrando las nubes de puntos.

Agradecimientos

La investigación que ha llevado a estos resultados ha recibido fondos de los proyectos RoboCity2030-III-CM (Robótica aplicada a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos. fase III; S2013/MIT-2748), financiado por los Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid y cofinanciado por los Fondos Estructurales de la Unión Europea, DPI2014-56985-R (Protección robotizada de infraestructuras críticas), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España, y SAVIER (Situational Awareness Virtual Environment), dirigido y financiado por Airbus Defence & Space.

Referencias

- [1] Chen, J.Y.C., Haas, E.C., Barnes, M.J., (2007) Human performance issues and user interface design for teleoperated robots. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 37(6):1231-1245.
- [2] Codd-Downey, R., Forooshani, P. M., Speers, A., Wang, H., Jenkin, M. (2014). From ROS

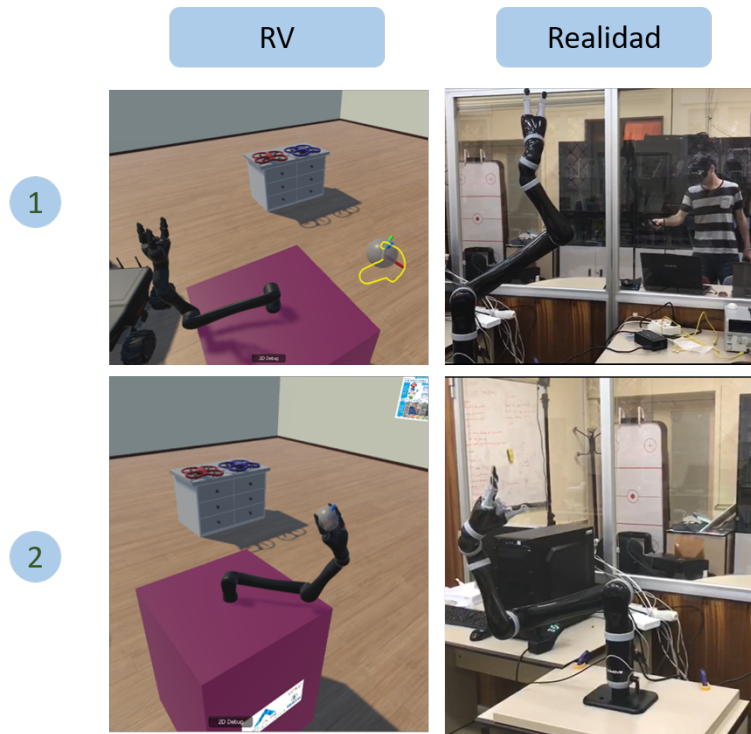


Figura 5: Comandado del robot manipulador.

- to unity: Leveraging robot and virtual environment middleware for immersive teleoperation. In *Information and Automation (ICIA)*, 2014 IEEE International Conference on (pp. 932-936). IEEE.
- [3] Foit, K. (2014). Mixed reality as a tool supporting programming of the robot. In *Advanced Materials Research* (Vol. 1036, pp. 737-742). Trans Tech Publications.
- [4] Garzón, M., Valente, J., Roldán, J. J., Cancar, L., Barrientos, A., Del Cerro, J. (2015). A multirobot system for distributed area coverage and signal searching in large outdoor scenarios. *Journal of Field Robotics*.
- [5] Gaschler, A., Springer, M., Rickert, M., Knoll, A. (2014). Intuitive robot tasks with augmented reality and virtual obstacles. In *Robotics and Automation (ICRA)*, 2014 IEEE International Conference on (pp. 6026-6031). IEEE.
- [6] Ghiringhelli, F., Guzzi, J., Di Caro, G. A., Caglioti, V., Gambardella, L. M., Giusti, A. (2014). Interactive augmented reality for understanding and analyzing multi-robot systems. In *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*, 2014 IEEE/RSJ International Conference on (pp. 1195-1201). IEEE.
- [7] Hoenig, W., Milanes, C., Scaria, L., Phan, T., Bolas, M., Ayanian, N. (2015). Mixed reality for robotics. In *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015 IEEE/RSJ International Conference on (pp. 5382-5387). IEEE.
- [8] Kuffner, J. J., LaValle, S. M. (2000). RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning. In *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on* (Vol. 2, pp. 995-1001). IEEE.
- [9] Lin, A., Milshteyn, A., Herman, G., Garcia, M., Liu, C., Rad, K., Boussalis, H. (2014). Virtual reality head-tracking observation system for mobile robot. In *Embedded Computing (MECO)*, 2014 3rd Mediterranean Conference on (pp. 152-157). IEEE.
- [10] Matsas, E., Vosniakos, G. C. (2017). Design of a virtual reality training system for human-robot collaboration in manufacturing tasks. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 11(2), 139-153.
- [11] Roldán, J. J., Garcia-Aunon, P., Garzón, M., de León, J., del Cerro, J., Barrientos, A. (2016). Heterogeneous Multi-Robot System for Mapping Environmental Variables of Greenhouses. *Sensors*, 16(7), 1018.
- [12] Ruiz, J. J., Viguria, A., Martinez-de-Dios, J. R., Ollero, A. (2015). Immersive displays

for building spatial knowledge in multi-UAV operations. In Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2015 International Conference on (pp. 1043-1048). IEEE.

- [13] Sucan, I. A., Moll, M., Kavraki, L. E. (2012). The open motion planning library. IEEE Robotics & Automation Magazine, 19(4), 72-82.
- [14] Sucan, I. A., Chitta, S. (2013). Moveit!. On-line at <http://moveit.ros.org>.
- [15] Wen, R., Tay, W. L., Nguyen, B. P., Chng, C. B., Chui, C. K. (2014). Hand gesture guided robot-assisted surgery based on a direct augmented reality interface. Computer methods and programs in biomedicine, 116(2), 68-80.

Evolución de la robótica social y nuevas tendencias

Antonio J. Pérez Vidal Álvaro Castro-González Fernando Alonso-Martín
 University Carlos III of Madrid University Carlos III of Madrid University Carlos III of Madrid
 100355616@alumnos.uc3m.es acgonzal@ing.uc3m.es famartin@ing.uc3m.es

José Carlos Castillo Miguel Ángel Salichs
 University Carlos III of Madrid University Carlos III of Madrid
 jocastil@ing.uc3m.es salichs@ing.uc3m.es
Resumen

La robótica cada día es una realidad más presente en nuestras vidas, cambiando la forma con la que las personas interactuamos con nuestro entorno e incluso entre nosotros. En este artículo se hace una revisión histórica del campo de la robótica social así como sus aplicaciones y campos de investigación. Para ello se muestra la evolución en cuatro periodos comprendiendo el origen, el estado actual de las investigaciones y el futuro sofisticado hacia el cual se dirige.

Palabras clave: Robótica social, interacción humano-robot, inteligencia artificial.

1. INTRODUCCIÓN

La ciencia ficción ha jugado un papel muy importante en la creación de la imagen de un robot. Una imagen presente en gran medida tanto en la industria cinematográfica como en la literatura. Este conjunto ha creado una idea parcialmente mitificada de lo que un robot es o puede llegar a ser. Sin embargo, el aludir a la idea de robot acuñada por la ciencia ficción como eso mismo (ciencia ficción), no significa que sea una idea descabellada o que esté tan alejada de la realidad, o al menos de una realidad futura.

El concepto de robot difiere entre algunos científicos a la hora de adjudicarlo en algunas máquinas, pero generalmente todos coinciden en determinados factores. Así, un robot es una máquina programable que puede manipular objetos y realizar operaciones que antes sólo podían realizar los seres humanos. El robot puede ser tanto un mecanismo electromecánico físico como un sistema virtual de software. Ambos coinciden en brindar la sensación de contar con capacidad de pensamiento o resolución, aunque gran parte de los robots por ahora se limitan a ejecutar órdenes dictadas por las personas [17].

Nos encontramos en una época en la que la tecnología avanza a velocidades vertiginosas,

aunque la mayoría de las personas piensen que existe cierto estancamiento en este ámbito. La realidad es que el mundo de la ciencia y la tecnología sí que ha avanzado a grandes pasos en estas décadas. Hace cuarenta años nadie podía soñar con poder hablar con alguien a distancia y al mismo tiempo poder ver a esa persona, y sin embargo ahora tenemos smartphones que hacen eso y mucho más. Tenemos entre otras muchas cosas, mecanismos de reconocimiento facial y de voz, comienzan a aparecer los coches autónomos, e incluso se está organizando actualmente el viaje de colonización a Marte. Cosas que hoy en día parecen prácticamente normales y sin embargo años décadas atrás tan sólo eran sueños.

Dentro de toda esta nueva era tecnológica la robótica juega un papel fundamental, y es que su estudio aporta cada vez más mejoras a la vida cotidiana y a los trabajos complicados. Campos como los exoesqueletos estudian ayudar a las personas con discapacidades motrices, intentando mejorar sus vidas; los automóviles autónomos se encuentran ya en el mercado comenzando a aumentar sus ventas; los robots espaciales nos brindan imágenes de planetas a miles de millones de kilómetros de distancia y nos ayudan a poder entender mejor nuestro universo.

Aquí tienen un lugar especial los denominados robots sociales cuyo objetivo principal es interactuar con los humanos de forma totalmente natural e intuitiva como si fueran un ser vivo más. Vamos a entrar en materia dentro de la robótica social, haciendo un repaso acerca de en qué consiste exactamente un robot social y comentando brevemente los orígenes de esta ciencia, su estado actual y por último un breve apartado imaginativo sobre qué deparará el futuro de esta tecnología.

2. ROBÓTICA SOCIAL

La robótica social está introduciéndose a un ritmo moderado dentro de la sociedad humana formando parte de la normalidad del día a día, permitiendo así que el contacto y la interacción

humano-robótica se produzca a mayor escala, incluyendo así poco a poco a los robots en la vida social humana. Pero, ¿qué quiere decir que un robot es social? La sociabilidad implica la existencia de relaciones de interacción. Un agente capaz de interactuar y poseer un comportamiento comunicativo es considerado social. La simple existencia de dos robots autónomos en el mismo entorno fuerza aspectos del contacto social, sea éste directo o indirecto.

Una perspectiva es que uno mismo debe estar consciente de sus estados mentales y ser capaz de atribuir estados mentales a otros, lo que permite predecir y analizar los comportamientos de uno mismo y de los demás. Esto permitiría a uno ser capaz de lidiar con relaciones sociales complejas y también exhibir la habilidad para resolver problemas abstractos. La hipótesis Maquiavélica [2], promulga que todas estas capacidades intelectuales evolucionaron de un dominio social. La hipótesis de inteligencia social fomenta la teoría de que para poder alcanzar un grado de comportamiento inteligente de un agente, éste debe estar incorporado tanto en un entorno físico como en un entorno social. Este agente estará por lo tanto sujeto a interacciones sociales dinámicas y complejas en el mundo real, factor que en Duffy, Brian R. et al. [2] es considerado necesario para el desarrollo de un agente de inteligencia artificial. El entendimiento mutuo por parte de los miembros de un grupo social es necesario para el establecimiento y continuidad del grupo. Los problemas aparecen cuando miembros individuales están motivados por intereses exclusivamente propios. Sin embargo, en muchos grupos sociales aparecen grados de flexibilidad con la evolución de cada estatus social de los miembros, y puede ser diferente en distintos contextos orientados a objetivos. Mientras que en sociedades primitivas se utiliza solamente el contacto físico como interacción social, los humanos hemos desarrollado métodos más eficientes a través del lenguaje. Se cree que el lenguaje no funciona tan sólo como un método para adquirir conocimiento sobre las características del comportamiento de otros, sino que también expone sus estados internos como los sentimientos y aptitudes. Para poder construir una base para la interacción y la cooperación, los individuos tienen que comunicarse y unir sus conceptos del mundo con los grados de abstracción siendo socialmente fundamentados y actualizados continuamente.

Como se puede comprobar, la inclusión de los robots sociales en términos de definición es un tema bastante delicado, puesto que es necesaria

la existencia de una conjunción de una gran variedad de factores inherentes a la inteligencia para poder establecer un agente social. Los robots sociales aún se encuentran en un estadio precoz en cuanto a las consideraciones de la comunicación y la interacción, dependientes de la inteligencia artificial. Además de esos factores, deben poder ser autónomos y también poseer una apariencia agradable ya que su objetivo principal será la interacción con los humanos, también tienen que ser fáciles de programar por personas no expertas, intrínsecamente seguros, tolerantes a percepciones y acciones imprecisas y, sobre todo, estar dotados de una gran capacidad de aprendizaje y adaptabilidad a entornos no predefinidos y dinámicos. En términos básicos, se puede definir a un robot social como *“aquel robot que interactúa y se comunica con las personas (de forma sencilla y agradable) siguiendo comportamientos, patrones y normas sociales”*[19].

Aunque los robots aún se encuentran lejos de poder tomar consciencia propia y formar jerarquías basadas en comunidades sociales, su inclusión e interacción con la sociedad es cada vez más patente, promoviendo así su desarrollo y su investigación gracias a la aceptación social.

2.1. Primer período (1940-1990)

Podría decirse que en el inicio, la robótica social se inspiró en las investigaciones de las comunidades biológicas animales [8] y las interacciones entre los individuos que las componen. Los investigadores siempre se han fascinado por la naturaleza que les rodea y sus composiciones, intentando recrearlas de forma artificial en los laboratorios. Así nace la robótica social (en un estado primigenio) al intentar reproducir las interacciones de las comunidades biológicas de forma artificial.

Uno de los primeros experimentos acerca de la interacción de los robots con el entorno fue llevado a cabo por William Grey Walter [22], el cuál diseñó y construyó unas tortugas robóticas (Figura 1) en a finales de los cuarenta. Mediante faros enganchados en la parte frontal de la carcasa y fototaxis positiva, estas tortugas interactuaban de una forma similar a la social, aunque no había comunicación explícita o reconocimiento mutuo.

Mientras el campo de la vida artificial emergía, los investigadores empezaron a aplicar principios como la estigmergia [7] (comunicación indirecta entre individuos a través de modificaciones en el entorno compartido; en sistemas descentralizados, tales como las colonias de hormigas, los diferentes componentes colaboran a través de pautas o hitos dejados en el medio: feromonas, acumulación de

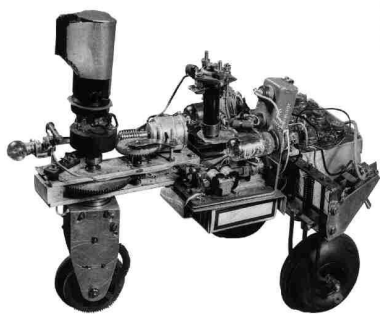


Figura 1: Tortuga robot Elmer de Walter [6]

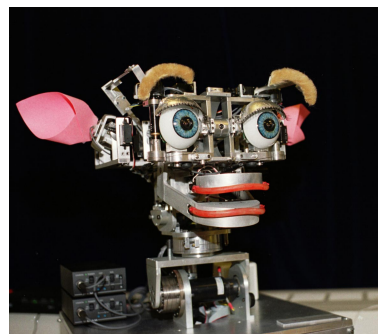


Figura 2: Robot Kismet [4]

objetos o cualquier otro tipo de cambio físico, como la temperatura) para lograr comportamientos colectivos en robots.

Uno de los pioneros en los primeros experimentos de la estigmergia fue Jean Louis Deneubourg, mediante la creación de robots parecidos a las hormigas en 1990 [8]. Desde entonces, una gran cantidad de investigadores han desarrollado robots colectivos y han usado robots como modelos para el estudio del comportamiento social de los insectos. Principios parecidos se pueden encontrar en investigaciones sobre sistemas multi-robot o sistemas robóticos distribuidos. Algunos mecanismos de interacción utilizados son comunicación, interferencia y competición agresiva.

2.2. Segundo Período (1990-2005)

En 1990 se crea Kismet [12], uno de los primeros robots sociales. Kismet (Figura 2) es una cabeza robótica fabricada en el MIT por la doctora Cynthia Breazeal como un experimento en computación afectiva, una máquina capaz de reconocer y simular las emociones. Para interactuar adecuadamente con los humanos, posee dispositivos de entrada que le proveen de audición, visión y habilidades propioceptivas. Además, Kismet simula emociones mediante varias expresiones faciales, vocalizaciones y movimiento. La expresiones se crean gracias a los movimientos de las orejas, cejas, párpados, labios, mandíbula y cabeza. La idea de la doctora Breazeal era representar su relación con el robot como lo hace un padre o un cuidador con su hijo.

Entre 1996 y 2001 la compañía japonesa Honda crea los robots antropomórficos P1, P2, P3, P4 y finalmente ASIMO (Figura 3). Aunque los cuatro primeros robots fueron creados para investigar sobre la robótica humanoide, ASIMO sirvió para investigar además con la interacción humano-robot, específicamente con los robots de compañía [10]. Para ello es capaz de reconocer las posturas y los gestos, pudiendo reaccionar a ellos, además distingue los sonidos, es decir, puede responder a su

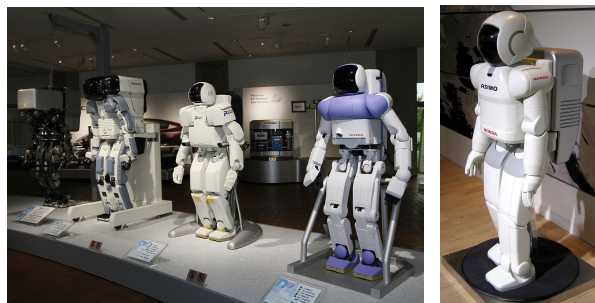


Figura 3: De izquierda a derecha: robots P1, P2, P3, P4 y ASIMO [11]

nombre, observar a la gente cuando se le habla, y reconoce sonidos inusuales como el de un objeto que cae o una colisión, y mira en la dirección del golpe. Es capaz de responder preguntas, mediante un breve movimiento del cuerpo en general o de solo la cabeza, o con una respuesta verbal.

A partir del siglo XXI, gracias a la nuevas tecnologías, la robótica social comienza a tener un sentido físico y tecnológico y empiezan a aparecer cada vez más robots sociales con capacidad de interacción con los humanos.

2.3. Tercer período (2009-2017): Presente

Se ha avanzado mucho desde aquellos robots sociales primigenios anteriormente comentados. La tecnología que actualmente está en manos de los investigadores supera con creces aquella de la que disponían los pioneros de la robótica. Con cada año que pasa se obtienen nuevos avances tecnológicos que proveen de mejores herramientas para enfocar todo tipo de investigaciones.

A lo largo de estos años, se han llevado a cabo numerosas investigaciones en una gran variedad de ámbitos dentro de la robótica social. Una parte importante de la interacción humano-robot es la representación de emociones. Diversos estudios han demostrado que un robot puede imitar



Figura 4: El robot ERWIN falla al intentar atraer la atención del usuario, por lo que expresa enfado después de varios intentos fallidos [16].

expresiones humanas reconocibles. Es necesario tanto que el humano sea capaz de reconocer la expresión del robot analizando el contexto en el que se entra, como viceversa, ya que las respuestas emocionales de ambos agentes se deben adecuar a lo que sus sentidos perciben. Para avanzar en este propósito se han realizado experimentos con robots que tenían un rango de expresiones (alegría, tristeza, enfado, sorpresa y miedo) que mostraban a una persona para atraer su atención [16]. El robot reconocía la cara del humano y dependiendo de si la persona le prestaba atención o no, iba variando sus expresiones (4). Por supuesto además de la expresión reconocida, el contexto emocional en el cual se produce es muy importante para entenderla, ya que aunque las expresiones de los robots están bastante logradas, en algunas ocasiones pueden confundir al usuario.

En el experimento realizado en Zhang J. y Sharkey A.J.C. [24], se investigó la capacidad de interpretación de los usuarios ante las expresiones de un robot con un contexto musical, tanto cuando éstas eran congruentes e incongruentes con él. Se comprobó así que un contexto musical afecta a la forma de juzgar las expresiones del robot.

Además de reconocer los gestos y expresiones de los robots, el usuario debe sentirse cómodo con el robot. El estudio del aspecto de los robots es esencial para que las interacciones sociales se puedan llevar a cabo. Los humanos somos una especie con costumbres arraigadas y con temor a lo desconocido. Todo aquello que nos resulta extraño y poco o nada familiar nos produce una sensación de desconfianza y miedo, por lo tanto si un robot tiene unos rasgos poco familiares o un tanto oscuros y extravagantes, probablemente produzca una reacción de rechazo en la mayoría de las personas. Es por ello por lo que los robots sociales tienen formas familiares, para que las personas se

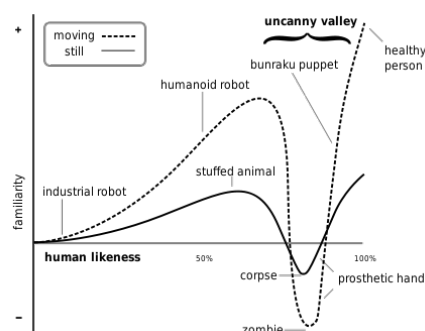


Figura 5: Diagrama del Uncanny Valley [20]



Figura 6: Robot Nuka como entretenimiento beneficioso para ancianos [18]

sientan cómodas con ellos y no se asusten. Para ello se les dota a los robots de ciertos rasgos humanos como ojos, boca, cejas, orejas. Sin embargo estudios realizados sobre la apariencia humana de los robots demuestran que cuanto más cerca de la apariencia real humana se encuentra el robot, más rechazo produce. Este fenómeno es el denominado *uncanny valley*, cuya curva de agrado humano se puede apreciar en la Figura 5. Aparte de la apariencia se ha observado que el audio también influye en generación de la sensación de extrañeza y repulsión. En experimentos realizados en Meah L.F.S. y Moore R.K. [15], la apariencia realmente humana de robots junto con voces humanas mezcladas electrónicamente provocaban el rechazo. Por un lado los ojos eran un factor determinante en la apariencia ya que se consideraban como ojos sin luz y sin vida. Por otro lado la voz humana modificada electrónicamente producía una tensión perceptiva que era considerada como extraña y horrible.

Otros estudios se centran en el uso de los robots sociales en el campo de la asistencia a ancianos y niños. Los experimentos llevados a cabo en este campo comprenden desde robots que ayudan a personas con enfermedades degenerativas, como el Parkinson, a tomar su medicación [23], robots con formas de animales para la mejora de la salud de los ancianos [13] (Figura 6), etc.

Un ejemplo de un experimento de este tipo es el llevado a cabo en Fujimoto I. et al. [9], donde un

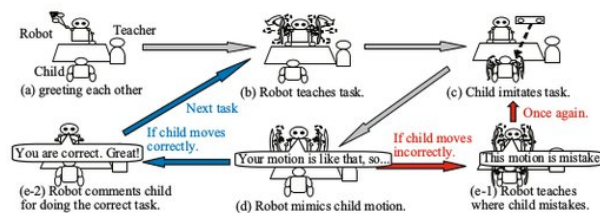


Figura 7: Escenario interactivo de imitación [9]

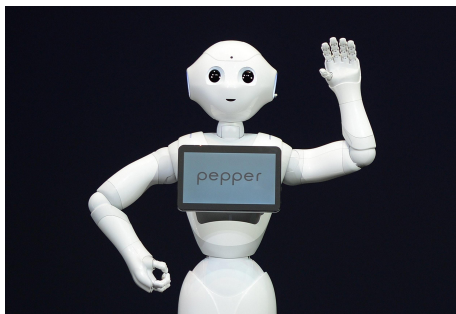


Figura 8: Robot Pepper [5]



Figura 9: Robot MAGGIE [14]

robot social producía movimientos que el niño con autismo debía copiar, el robot observaba al niño y si éste se equivocaba le corregía hasta que el resultado fuera el buscado. Los resultados fueron satisfactorios, demostrando que los niños realmente mejoraban sus habilidades de imitación. El método de interacción se puede observar en la Figura 7.

Además de todos los estudios y experimentos que se están realizando, se pueden destacar varios robots sociales conocidos que están a la vanguardia de la tecnología.

El primero y el cual ya se está comercializando, se trata del robot Pepper (Figura 8). Creado por SoftBank Robotics [21]. Su principal cualidad es la de percibir las emociones y adaptar su comportamiento al estado anímico del usuario. En Japón este robot se está utilizando ya como forma de recibir, informar y entretener a los clientes.

Dentro del ámbito de robots sociales de entretenimiento educativo y asistencial podemos encontrar al robot MAGGIE (Figura 9). MAGGIE [14] ha sido diseñado y creado en el departamento de robótica social del Robotics Lab de la Universidad Carlos III de Madrid. Su objetivo principal es el de estudiar la interacción humano-robótica, además de avanzar en el desarrollo de la autonomía y la inteligencia de los robots.

Además de MAGGIE, el Robotics Lab también posee los robots Mini Maggie y MBot (Figura 10), el robot con el que participaron en el proyecto europeo MONarCH, que se utilizan en proyectos de robótica social con ancianos, personas dependien-



Figura 10: Robot MBot [3]

tes y niños ingresados en hospitales.

La lista de robots sociales es cada vez más larga puesto que cada vez más este tipo de robots se ve como proyectos comerciales. Entre ellos podemos encontrar a NAO, el robot HRP-4C, Nuka, Jibo o Sota que también abarcan el campo de asistenciales.

2.4. Futuro

En un futuro próximo los avances dentro de la robótica social nos mostrarán varios tipos de robots totalmente desarrollados tecnológicamente como por ejemplo los robots asistenciales que ayudarán en los hospitales, o en las casas de las personas discapacitadas o enfermas. Facilitarán las labores sanitarias y ayudarán acelerar las actividades de urgencias e incluso en planta. Además podrán ayudar a los médicos a evaluar un

diagnóstico cuando sea requerido ya que tendrán una base de datos a la que podrán acceder con suma rapidez, con todas las enfermedades y sus respectivas curas. Por supuesto existirán versiones robóticas de ayuda en cirugía, más avanzadas que las que están empezando a surgir. Las incluyo dentro del ámbito de los robots sociales porque se relacionarán con el cirujano aconsejándole y compartiendo y aliviando así la carga de la operación.

En cuanto a los robots que asistan en casas de personas discapacitadas o enfermas, dispondrán de la tecnología necesaria para administrar los fármacos y terapias prescritas por sus médicos, además de ayudarles con sus tareas diarias.

Por otro lado, tanto en las residencias de ancianos como en las plantas pediátricas los pacientes podrán disponer y disfrutar de la compañía de robots sociales que les entretengan y les diviertan jugando y hablando con ellos, haciendo su día a día un poco más llevadero. Todos estos robots no tendrán por qué ser necesariamente antropomorfos, si no que habrá modelos con diferentes formas que corresponderán a las necesidades que se requieran de ellos.

Todos los robots sociales deberán estar provistos de una inteligencia artificial, que les permita aprender de su entorno y poder reaccionar a diferentes situaciones del modo correcto. Esta inteligencia será la que les dote de su autonomía. Naturalmente con los años esta inteligencia será más sofisticada, hasta el punto que los robots realmente puedan tomar sus propias decisiones sin necesidad de que un humano deba decirles qué hacer en cada situación.

Sin embargo, si con inteligencias artificiales mejoradas adquieren una mayor autonomía, si aprenden más acerca de todo lo que les rodea, incluso de sí mismos, llegado el momento, ¿es posible que pudieran llegar a adquirir consciencia propia? ¿Es posible que lleguen a razonar? Y si esto ocurriera, ¿no podrían ser considerados entonces como seres con “vida” de algún modo? Si un robot es capaz de razonar y de pensar, entonces puede que llegue a comprender su existencia y qué lugar ocupa en la sociedad, pudiendo por lo tanto definirse como un individuo. Quizá llegado este punto, en el que toma consciencia de que es una herramienta para la sociedad, pueda comenzar a desarrollar una especie de sentimientos, como ira o miedo hacia los humanos, quizá al poder pensar por sí mismo, afloren en él ciertas ansias de libertad, de poder decidir que hacer con esta especie de vida con la que se la ha dotado. Es aquí donde entrarán en conflicto multitud de valores éticos como el esclavismo del que hablábamos antes, apelando a dere-

chos como la vida o la seguridad.

El artículo 3 de la Declaración de los Derechos Humanos define: *Todo individuo tiene derecho a la vida, a la libertad y a la seguridad de su persona*. Si el robot en cuestión puede definirse a sí mismo como un individuo diferente a otros robots, siendo único, ¿no puede ser aplicado este artículo a su favor?

Evidentemente estos son terrenos pantanosos de difícil salida, y tendríamos que obviar el hecho de que este artículo se aplica dentro de los derechos humanos y un robot definitivamente no es un ser humano.

No obstante, si algo nos ha enseñado la historia es que ante los nuevos cambios, siempre existen dos bandos, uno a favor y otro en contra, por lo que en este caso habría gente *prorrobótica* y gente *robófoba*. Habría personas que lucharían por la declaración de unos derechos robóticos, rogando por el reconocimiento de su ser y su libertad.

Además, como explicábamos antes en lo referente al tema del parecido físico a los humanos, en este caso la cosa cambia. Si antes la semejanza producía un rechazo, ahora se producen dos vertientes.

Al demostrar su propia consciencia y su capacidad de pensar y razonar, el segmento de la sociedad que sea *prorrobótico*, los aceptará con mayor fervor que antes, llegando incluso a producirse relaciones entre robots y humanos, pudiendo proclamarse estos últimos como *robosexuales*. Por otro lado la parte de la sociedad que sea *robófoba*, denotará un rechazo mayor, pronunciado por el temor a estos seres mecánicos que se hacen pasar por personas.

3. CONCLUSIONES

A lo largo del artículo se han presentado las nociones principales de la definición de robot, así como de la robótica social, mostrando en qué consiste exactamente esta materia y qué campos de acción abarca. Para poder englobar esta especialidad, se ha realizado un repaso a las etapas evolutivas de la robótica social, pudiendo así observar los progresos realizados en distintos campos y su difusión a tantos otros.

Como se ha podido comprobar la robótica social se encuentra cada vez más presente en nuestro uso diario, proporcionándonos día tras día servicios de atención al usuario. La interacción humano-robot está patente en multitud de campos, desde juguetes y atención al cliente hasta el tratamiento de pacientes, facilitando en gran medida las tareas de los trabajadores y aportando soluciones y beneficios a investigaciones tecnológicas y humanas, además de proporcionar un entretenimiento instructivo y divertido.

El desarrollo y progreso de las distintas aplicaciones de la robótica social avanza a pasos agigantados hacia modelos más sofisticados procurando un futuro cercano lleno de tecnologías robóticas. Sin embargo, aunque por supuesto el progreso siempre es beneficioso, se tienen que tener en cuenta muchos factores a la hora de implantar una nueva tecnología y es por ello que al igual que la robótica social se encuentra en plena investigación, así mismo se encuentran las leyes que por las que se regirán las acciones procuradas por un entorno robótico sofisticado. Entran así en conflicto temas éticos como la influencia de un robot en la educación, en el crecimiento infantil, la moralidad esclavista en cuanto a máquinas, derechos robóticos, los factores psicológicos y emocionales que esta generación tecnológica puede producir, etc.

Agradecimientos

La investigación desarrollada ha recibido financiación de dos proyectos: “Development of social robots to help seniors with cognitive impairment” (ROBSEN), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad; y “RoboCity2030-III-CM”, financiado por la Comunidad de Madrid y cofinanciado por los Fondos Estructurales de la Unión Europea.

Referencias

- [1] Canal Jubilación (s.f.), Asibot y Maggie, dos robots para personas mayores “made in Spain”, *Jubilación CANALES MAPFRE*. Recuperado de: <https://www.jubilacionypension.com/planes-fondos/asibot-y-maggie-dos-robots-para-personas-mayores-made-in-spain/>
- [2] Duffy, Brian R., Rooney, Colm, O’Hare, Greg M.P., O’Donoghue, Ruadhan, (1999) What is a social robot?, 10th Irish Conference on Artificial Intelligence and Cognitive Science, University College Cork, Ireland, 1-3 September, 1999
- [3] Edutainment, (s.f.), *Idmind Living Robotics*. Recuperado de: <http://www.idmind.pt/markets/edutainment/>
- [4] Edwards, T., (2015), Emotive Robots Key to Unlocking IOT Potential, *Digitally Approved Blog*. Recuperado de: <http://www.digitallyapproved.com/tag/kismet/>
- [5] El robot Pepper se agota en un minuto al salir a la venta en Japón, (2015), *Público*. Recuperado de: <http://www.publico.es/ciencias/robot-pepper-agota-minuto-al.html>
- [6] Elmer_Elsie Robots (s.f.), *The Old Robots Website*. Recuperado de: <http://www.theoldrobots.com/ElmerElsie.html>
- [7] Estigmergia (s.f.), *Wikipedia*. Recuperado de: <https://es.wikipedia.org/wiki/Estigmergia>
- [8] Fong, T., Nourbakhsh, I., Dautenhahn, K. (2003) A survey of socially interactive robots. In: *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 42, Issues 3-4, Elsevier, Pittsburgh, Lausanne, Hertfordshire
- [9] Fujimoto I., Matsumoto T., De Silva P.R.S., Kobayashi M., Higashi M. (2010) Study on an Assistive Robot for Improving Imitation Skill of Children with Autism. In: Ge S.S., Li H., Cabibihan J.J., Tan Y.K. (eds) *Social Robotics. ICSR 2010. Lecture Notes in Computer Science*, vol 6414. Springer, Berlin, Heidelberg
- [10] George A. Bekey, (2005) *Autonomous Robots: From Biological Inspiration to Implementation and Control*, MIT Press, Hardcover, 577 pages. ISBN 0262025787
- [11] Honda P Series (Robots) (s.f.), *Wikipedia*. Recuperado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Honda_P_series_\(Robots\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Honda_P_series_(Robots))
- [12] Kismet (robot) (s.f.), *Wikipedia*. Recuperado de: [https://en.wikipedia.org/wiki/Kismet_\(robot\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Kismet_(robot))
- [13] Leong T.W., Johnston B. (2016) Co-design and Robots: A Case Study of a Robot Dog for Aging People. In: Agah A., Cabibihan J.J., Howard A., Salichs M., He H. (eds) *Social Robotics. ICSR 2016. Lecture Notes in Computer Science*, vol 9979. Springer, Cham
- [14] Maggie: futuro, autonomía y diversión (s.f.), *uc3m, Universidad Carlos III de Madrid*. Recuperado de: http://portal.uc3m.es/portal/actualidad_cientifica/actualidad/reportajes/archivo_reportajes/archivo_reportajes/Maggie_futuro_autonomia_diversion
- [15] Meah L.F.S., Moore R.K. (2014) The Uncanny Valley: A Focus on Mismatched Cues. In: Beetz M., Johnston B., Williams M.A. (eds) *Social Robotics. ICSR 2014. Lecture Notes in Computer Science*, vol 8755. Springer, Cham
- [16] Murray J.C., Cañamero L., Bard K.A., Ross M.D., Thorsteinsson K. (2009) The Influence of Social Interaction on the Perception of Emotional Expression: A Case Study with a

- Robot Head. In: Kim JH. et al. (eds) *Advances in Robotics. FIRA 2009. Lecture Notes in Computer Science*, vol 5744. Springer, Berlin, Heidelberg
- [17] Pérez Porto, J., Merino, M.. Publicado: 2010. Actualizado: 2013. Definición de robot, *Definicion.de*. Recuperado de: <http://definicion.de/robot/>
 - [18] Quincoces, A., (2016), La foca Nuka, un peluche robotizado que mejora la salud sin efectos secundarios, *ELPROGRESO*. Recuperado de: <http://elprogreso.galiciae.com/noticia/497120/la-foca-nuka-un-peluche-robotizado-que-mejora-la-salud-sin-efectos-secundarios>
 - [19] Rafael Rivas E., Eladio Dapena G. (s.f.), Construcción de un Robot con Habilidades Sociales, *LASDAI*. Recuperado de: http://www.ing.ula.ve/lasdai/?page_id=26
 - [20] Uncanny Valley (s.f.), *Wikipedia*. Recuperado de: https://simple.wikipedia.org/wiki/Uncanny_valley
 - [21] Who is Pepper? (s.f.), *SoftBank Robotics*. Recuperado de: <https://www.ald.softbankrobotics.com/en/cool-robots/pepper>
 - [22] William Grey Walter (s.f.), *Wikipedia*. Recuperado de: https://es.wikipedia.org/wiki/William_Grey_Walter
 - [23] Wilson J.R., Tickle-Degnen L., Scheutz M. (2016) Designing a Social Robot to Assist in Medication Sorting. In: Agah A., Cabibihan JJ., Howard A., Salichs M., He H. (eds) *Social Robotics. ICSR 2016. Lecture Notes in Computer Science*, vol 9979. Springer, Cham
 - [24] Zhang J., Sharkey A.J.C. (2011) Listening to Sad Music While Seeing a Happy Robot Face. In: Mutlu B., Bartneck C., Ham J., Evers V., Kanda T. (eds) *Social Robotics. ICSR 2011. Lecture Notes in Computer Science*, vol 7072. Springer, Berlin, Heidelberg

DISEÑO MECÁNICO DE UN ASISTENTE ROBÓTICO CAMARÓGRAFO CON APRENDIZAJE COGNITIVO

I. Rivas-Blanco, C. López-Casado, C. Pérez-del-Pulgar, F. García-Vacas, E. Bauzano, V.F. Muñoz
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Málaga, mclopezc@uma.es

J. C. Fraile

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Valladolid, jcfraile@eii.uva.es

Resumen

Este artículo describe el diseño mecánico y la arquitectura cognitiva de un asistente robótico camarógrafo que combina las ventajas de los dispositivos intra-abdominales y la navegación autónoma. El asistente robótico está compuesto por un robot cámara intra-abdominal con acople magnético y con dos grados de libertad. La inteligencia del robot se basa en una arquitectura cognitiva basada en memoria a largo plazo para almacenar el conocimiento del robot y capacidades de aprendizaje para mejorar el comportamiento del mismo. La estrategia de navegación del robot cámara combina un control reactivo basado en el seguimiento del instrumental quirúrgico; junto con un control proactivo basado en comportamientos predefinidos dependientes del estado actual de la tarea. Tanto la arquitectura cognitiva como el diseño mecánico han sido validados con una serie de experimentos que se detallan en el artículo. Previamente, todo el diseño e implementación son descritos.

Palabras Clave: Mecatrónica, robótica médica, robótica cognitiva, control robótico, navegación robótica.

1 INTRODUCCIÓN

La cirugía mínimamente invasiva está globalmente aceptada y proporciona una serie de beneficios para los pacientes. Aun así, presenta una serie de limitaciones con respecto a la cirugía abierta convencional. Una de las principales limitaciones es la necesidad de un endoscopio que permita visualizar el campo de visión de la intervención. El movimiento del endoscopio está restringido por el puerto de acceso del mismo, el cual sólo proporciona cuatro grados de libertad (DoFs) de movimiento: dos rotacionales alrededor del punto de entrada, otro rotacional alrededor del eje longitudinal del endoscopio y por último uno translacional a lo largo de dicho eje. Esta limitación de movimiento se

traduce directamente en una limitación en el campo de visión, ya que aparecen muchas zonas ocultas a las que el endoscopio no puede acceder. Por otro lado, la laparoscopia convencional necesita de un asistente dedicado únicamente a la sujeción y movimiento del endoscopio. La fatiga y el estrés, especialmente en intervenciones de larga duración, pueden afectar a la calidad y a la estabilidad de la imagen.

Una posible solución para aumentar el campo de visión durante intervenciones laparoscópicas es el uso de endoscopios flexibles. Estos dispositivos disponen de DoFs adicionales, pero son complejos de usar. La falta de rigidez afecta la estabilidad de la imagen y la existencia de horizontes visuales fijos hacen que el cirujano se tenga que adaptar a vistas inclinadas o incluso invertidas [1]. Otra opción es el uso de dispositivos intra-abdominales. Estos dispositivos son introducidos en la cavidad abdominal a través de orificios naturales o a través de incisiones abiertas para introducir el instrumental médico. Diferentes mecanismos de fijación a la pared abdominal han sido explorados: sutura [2], adosada a la aguja [3]... pero sólo el acople magnético [4] permite el movimiento de los dispositivos. A través de un agarre magnético externo, la cámara puede ser desplazada por la cavidad abdominal accediendo a zonas inalcanzables por los endoscopios tradicionales [5]. La viabilidad de este tipo de dispositivos magnéticos ha sido validada en experiencias de clínica humana [6] y se ha demostrado que esta técnica proporciona una vista mayor que la obtenida con dispositivos fijos [7]. Algunos autores han diseñado dispositivos con dos DoFs (rotación e inclinación) que se activan por medio de motores internos [8]. Aunque estas soluciones aumentan el campo de visión en comparación con los endoscopios tradicionales, este tipo de dispositivos todavía necesitan un asistente para manejar el agarre externo.

Con respecto a la navegación de la cámara, existen robots quirúrgicos específicamente diseñados para sostener los endoscopios. Éstos mejoran la eficiencia y reducen el número de personal necesario [9]. Normalmente, los movimientos de la cámara están

restringidos a un número de comandos, tales como ‘derecha’, ‘izquierda’... indicando la dirección de movimiento de la cámara. Estas instrucciones deben ser comandadas por el cirujano, haciendo que distraiga su atención de la tarea quirúrgica que desempeña. Por el contrario, estrategias de auto guiado de la cámara reducen la carga de trabajo del cirujano, ya que sólo debe atender a las tareas de cirugía propiamente dichas. Las estrategias de movimiento automáticas se dividen en dos: seguimiento de instrumental y navegación basada en el flujo de trabajo del protocolo quirúrgico.

El seguimiento del instrumental es una técnica que se basa en el seguimiento de la punta del instrumental quirúrgico [10]. Muchas de estas técnicas se fundamentan en procesamiento de imágenes, generalmente utilizando marcas de color [11]. Esta técnica tiene la ventaja de que no se necesitan sensores adicionales, pero el seguimiento sólo es posible cuando las marcas están visibles. Hay autores que mejoran el guiado de la cámara prediciendo el movimiento del instrumental utilizando modelos de Markov [12]. Sin embargo, todas las estrategias siguen reglas estáticas tales como seguir un instrumento, o el punto medio de dos instrumentos...[13].

Algunos autores utilizan clasificadores probabilísticos para modelar las tareas quirúrgicas [14]. En estos casos, la estrategia de guiado depende del estado actual de la tarea [15]. En trabajos previos de nuestro grupo [16], se propuso una mejora del tradicional seguimiento del instrumental definiendo diferentes puntos de seguimiento dependiendo del estado actual de la tarea quirúrgica. Además, este trabajo incluía un mecanismo de aprendizaje basado en las preferencias de los distintos cirujanos para mejorar el comportamiento del robot. Aunque este método tiene en cuenta el flujo de trabajo de la intervención, la cámara permanecía estática en cada estado del mismo. Aunque todos los métodos proporcionan un movimiento autónomo, carecen de inteligencia y conocimiento como para ser considerados autónomos [17].

Este artículo propone un concepto novedoso de asistente robótico camarógrafo, que combina las ventajas de los dispositivos intra-abdominales y los sistemas de navegación autónomos. El resto del artículo se organiza de la siguiente manera. El apartado 2 detalla el diseño mecánico del asistente robótico. En el apartado 3 se explica la arquitectura cognitiva que gestiona el movimiento automático del mismo. El apartado 4 incluye los experimentos y resultados obtenidos. Finalmente, las conclusiones están en el apartado 5.

2 ROBOT CÁMARA

Este apartado describe el diseño mecánico del asistente robótico camarógrafo y el modelo geométrico de la tarea.

2.1 DISEÑO MECÁNICO

La Figura 1 muestra el escenario de trabajo del asistente robótico. Éste está dividido en dos partes: un brazo robótico externo y un robot cámara interno. Ambos dispositivos están unidos a través de un agarre magnético que se encuentra ubicado en el efector final del brazo robótico. El robot cámara se introduce en la cavidad abdominal a través de una de las incisiones abiertas para introducir el instrumental médico. Una vez dentro de la cavidad abdominal, se sujeta a ésta a través de un acople magnético con el agarre externo. Este asistente robótico tiene seis DoFs: dos desplazamientos a través de la pared abdominal (d_x y d_y), una rotación (φ) generada por el robot externo; rotación e inclinación internas (α and β) y zoom digital que simula el movimiento entrante-saliente de los endoscopios tradicionales. El desplazamiento a lo largo de la pared abdominal permite acceder a cualquier área dentro de la cavidad abdominal, mientras que la rotación externa controla el horizonte de la imagen. Adicionalmente, la rotación e inclinación internas permiten ver el área de operación desde distintas perspectivas. Hecho bastante útil en imágenes 2D donde la percepción de profundidad se pierde.

El diseño mecánico del robot cámara se muestra en la Figura 2. El robot tiene las siguientes dimensiones: 30 mm \times 27 mm \times 88 mm, mientras que los imanes utilizados son de 20 mm de diámetro y 5 mm de altura. La cámara (modelo MO-F3506LSC-3T, Misumi Electronics Corp., Taiwan), de 8 mm de diámetro y 10.5 mm de longitud, tiene una resolución de 400 líneas TV, 50 fps y una distancia focal entre 5-10 cm, adecuada para proporcionar imágenes de alta resolución en un ambiente laparoscópico. La cámara incluye seis LEDs blancos, por lo que no se necesita iluminación adicional.

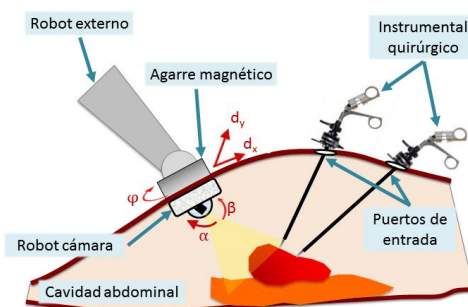


Figura 1. Escenario de trabajo.

El sistema de cableado que actúa sobre las rotaciones e inclinaciones internas puede verse en la Figura 3. La parte accionada está formada por dos mecanismos concéntricos (rotación e inclinación) que mueven la cámara en las direcciones indicadas por α y β . La parte motora está compuesta por dos motores (motor 1 y 2) que se encargan de la actuación del sistema. Ésta se basa en la transmisión de movimiento entre las dos poleas de la parte motora (poleas 1 y 2) y la dos de la parte accionada (poleas 3 y 4). En la parte accionada, unos cables (rojo y azul) están sujetos a la polea del mecanismo de rotación (polea 3) y otros (verde y naranja) están sujetos a la polea del mecanismo de inclinación (polea 4). En cuanto a la parte motora, los cables rojo y azul están conectados a la polea del motor 1 (polea 1) y los verde y naranja a la polea del motor 2 (polea 2). Esta conexión hace que una rotación incremental, θ_1 , del motor 1 se transmita como una rotación incremental, α , en el mecanismo de rotación. Por otro lado, una rotación incremental, θ_2 , del motor 2 se transite como una rotación incremental, β , en el mecanismo de inclinación. Suponiendo que no hay desplazamiento en los cables y que la anchura de los mismos es despreciable, las ecuaciones de la transmisión de movimiento pueden escribirse como:

$$\alpha = \frac{D_1}{D_3} \theta_1 \quad (1)$$

$$\beta = \frac{D_2}{D_4} \theta_2 \quad (2)$$

donde D_1 , D_2 , D_3 y D_4 son los diámetros de las poleas 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

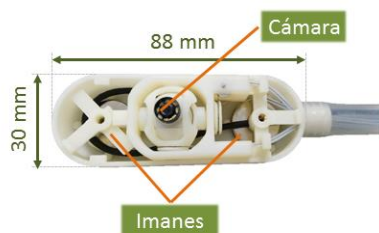


Figura 2. Vista desde arriba del robot cámara.

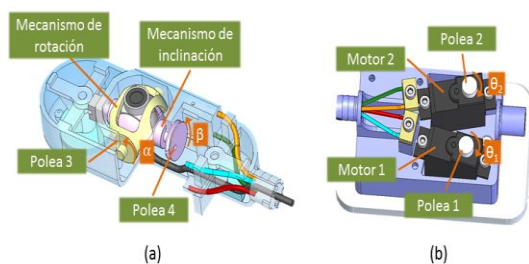


Figura 3. Sistema de cableado: (a) Parte accionada; (b) parte motora.

2.2 MODELO GEOMÉTRICO DE LA TAREA

El modelo geométrico de la tarea aparece en la Figura 4, donde el sistema de referencia global está indicado como $\{0\}$ y el sistema de referencia de la imagen 2D es el $\{I\}$. El origen del sistema de coordenadas $\{0\}$ está ubicado en el punto central de contacto del robot cámara con la pared abdominal. En cuanto al sistema de coordenadas $\{I\}$, su origen está ubicado en el centro de la imagen. El ancho, w , y alto de la imagen, h , dependen de la resolución. Los desplazamientos d_x y d_y originan movimientos de la imagen en los ejes X_0 e Y_0 , respectivamente. Por otro lado, la rotación externa, φ , origina una rotación de la imagen en el eje Z_0 . El zoom de la imagen se calcula digitalmente a través de la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{w_z}{h_z} \right) = \frac{1}{\text{zoom}} \left(\frac{w}{h} \right) \quad (3)$$

Donde w_z y h_z son el ancho y alto de la imagen para un valor determinado de zoom.

3 ARQUITECTURA CONGNITIVA DEL ROBOT CÁMARA

La arquitectura cognitiva (Figura 5) del robot cámara implementa la base del conocimiento del robot y las funciones de razonamiento para inferir la vista óptica en cada estado de la intervención. Para ello se basa en la información del escenario proporcionada a través del sistema de percepción. Una vez calculada la vista óptica, informa de la posición adecuada del robot cámara al sistema encargado de su movimiento. El módulo de interacción Hombre-Máquina permite la comunicación entre el robot cámara y el cirujano. Esta interacción se realiza a través de un interfaz hombre-máquina (HMI) que directamente comanda al robot un movimiento en concreto; y a través de un sistema de reconocimiento de gestos que permite inferir en qué estado de la tarea se encuentra la intervención.

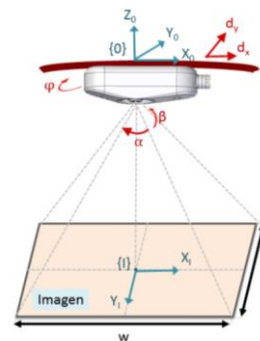


Figura 4. Modelo geométrico de la tarea.

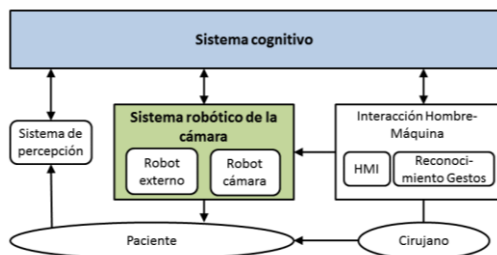


Figura 5. Arquitectura cognitiva.

Este sistema cognitivo combina un comportamiento reactivo basado en el seguimiento del instrumental junto con un comportamiento proactivo dependiente del flujo de trabajo de la intervención. De esta manera el asistente robótico es capaz de acomodar la vista de la cámara al estado actual de la intervención, pero con flexibilidad suficiente como para adaptar el comportamiento a situaciones no planificadas.

El sistema de reconocimiento de gestos ha sido analizado en trabajos previos [18][19], de ahí que quede fuera del ámbito de este trabajo. Para los experimentos, el sistema de percepción se ha reducido a un sistema de visión que monitoriza la posición de unas marcas.

3.1 SISTEMA COGNITIVO

Como se muestra en la Figura 6, el sistema cognitivo del robot está compuesto por dos tipos de memoria. La memoria a largo plazo que contiene el conocimiento global del sistema y en la que se codifica la información durante largos períodos de tiempo; y la memoria de trabajo, en la que se combinan la información del sistema cognitivo y la información de la memoria a largo plazo para presentar la situación actual.

La memoria a largo plazo se divide a su vez en memoria semántica y procedural. La primera almacena el conocimiento actual de la situación y se modela como una base de datos. Para el escenario de este trabajo, la memoria semántica incluirá información para el reconocimiento de los objetos a través de algoritmos de visión de segmentación. Es decir, se almacenarán los códigos HSV de las marcas de color asociadas a cada uno de los objetos que es necesario ubicar dentro del escenario, principalmente el instrumental quirúrgico. También, se incluirá información sobre las distintas fases en las que se divide el protocolo quirúrgico. Por cada protocolo quirúrgico a realizar se debe almacenar cada una de las fases que lo componen. Por último, se almacena también información sobre el punto de vista de la cámara para cada una de las fases del protocolo definidas anteriormente si se siguiera un comportamiento proactivo puro.

Por otro lado, la memoria procedural está asociada con el conocimiento no consciente. En este tipo de memoria se codifican las estrategias de navegación de la cámara. Éstas están divididas en dos grupos: seguimiento de instrumental y navegación basada en la fase del protocolo quirúrgico. La primera estrategia se considera un comportamiento reactivo; mientras que la segunda se considera proactivo. Ambas estrategias se basan en acciones pre-programadas rígidas y no contienen inteligencia ni conocimiento para ser consideradas estrategias de navegación autónomas. Mientras que el comportamiento reactivo tiene flexibilidad suficiente para seguir al instrumental médico, no posee la capacidad de adaptar el punto de vista dependiendo de la tarea que se está haciendo en el momento. Por el contrario, el comportamiento proactivo tiene la flexibilidad de ofrecer diferentes puntos de vista dependiendo del estado del protocolo, pero este comportamiento no puede ser modificado durante la duración de dicho estado. Por lo tanto, una estrategia que combine ambos comportamientos podría ofrecer un comportamiento proactivo sin perder las ventajas del seguimiento reactivo del instrumental.

Esta estrategia combinada se basa en calcular el foco de atención de la imagen (P_{FOA}) como una composición ponderada de las contribuciones de un comportamiento y otro:

$$P_{FOA} = K_r \cdot P_{INSTRUMENTAL} + K_p \cdot P_{ESTADO} \quad (4)$$

Donde K_r , K_p son los pesos asociados al comportamiento reactivo y proactivo, respectivamente. Estos pesos deben cumplir que $K_r, K_p \in [0,1] / K_r + K_p = 1$. El valor de estos pesos será aprendido a través del algoritmo de refuerzo que será descrito en el siguiente apartado.

En cuanto a la contribución reactiva, la posición considerada para el seguimiento de las dos herramientas utilizadas en el escenario (Figura 1) se calcula de la siguiente manera:

$$P_{INSTRUMENTAL} = K_{TOOLS} \begin{pmatrix} P_D \\ P_I \end{pmatrix} \quad (5)$$

Siendo $K_{TOOLS} = (\delta_D \delta_I) / (\delta_D + \delta_I)$, donde δ_D y δ_I son variables binarias que son verdaderas cuando la herramienta derecha y la izquierda, respectivamente, están en movimiento. Las posiciones de cada una de las herramientas son obtenidas a través de marcadores en las mismas y utilizando algoritmos de visión. Similarmente, la posición base asociada a la fase del protocolo (P_{ESTADO}) y por tanto base del comportamiento proactivo, se obtiene de manera equivalente, a través de marcadores en el escenario quirúrgico.

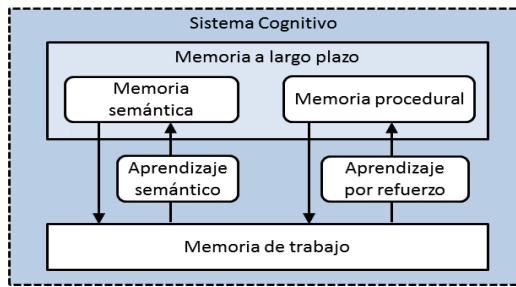


Figura 6. Sistema cognitivo.

3.2 APRENDIZAJE

El comportamiento del robot depende altamente de los valores de K_r y K_p . Valores elevados de K_r hacen que la cámara siga a las herramientas independientemente de la fase del protocolo, un comportamiento normalmente más cómodo para principiantes. Sin embargo, valores bajos de K_r hacen que la estrategia de navegación dependa del estado actual, comportamiento más apropiado para cirujanos expertos. Por lo tanto, para cada usuario, el sistema debe aprender los valores de K_r y K_p que proporcionan un mejor comportamiento del robot, es decir, que maximicen la satisfacción y rendimiento del usuario. El proceso de aprendizaje de estos valores se hace a través de un algoritmo de aprendizaje por refuerzo. Este método se basa en una serie de reglas ponderadas dependiendo del valor de refuerzo proporcionado al sistema. Este refuerzo depende de la adecuación de la regla elegida en cada momento, pudiendo ser un refuerzo o una penalización de la misma, dependiendo de lo acertada o no que fuese la acción para el estado actual del sistema [20].

Las reglas se codifican con una precondition ("SI") y una acción ("ENTONCES"). La precondition depende de la fase actual del protocolo y la acción incluye todos los posibles valores de $K_r = \{K_{r1}, K_{r2}, \dots, K_{rm}\}$ y $K_p = \{K_{p1}, K_{p2}, \dots, K_{pm}\}$ tal que $K_{pi} = 1 - K_{ri}$. Por tanto, cada regla se codifica como:

$$SI \text{ fase} = i \text{ ENTONCES } K_r = K_{ri} \text{ y } K_p = K_{pi} \quad (6)$$

Donde $1 \leq i \leq n$, siendo n el número de fases del protocolo. Para cada fase se generan m reglas posibles, las m posibles combinaciones de las constantes K_r , K_p . Además, todas las reglas llevan asociada una ponderación dependiente del refuerzo siguiendo la técnica de *Q-learning* [21]:

$$Q_i = (1 - \tau) \cdot Q_{i-1} + \tau \cdot (\text{refuerzo} + \mu \cdot EFR) \quad (7)$$

Donde $0 \leq \tau \leq 1$ es la tasa de aprendizaje; $0 \leq \mu \leq 1$, es el factor de descuento y EFR es el refuerzo futuro

esperado. La tasa de aprendizaje determina la importancia del nuevo conocimiento frente al antiguo; mientras que el factor de descuento determina la importancia de los refuerzos futuros. Finalmente, la manera de elegir una regla u otra en función del estado se realiza utilizando la política ϵ -greedy [22]. Según ésta, las reglas cuya precondition se cumpla, son seleccionadas aleatoriamente con una probabilidad ϵ y la acción con mayor ponderación es seleccionada con una probabilidad $1 - \epsilon$.

En cuanto al cálculo del refuerzo se hace a través de un modelo de lógica difusa que evalúa el comportamiento del robot durante cada fase. Este modelo depende de tres parámetros:

$$\text{refuerzo} = \text{difuso} (n\text{Correcciones}, \text{tiempo}, \text{satisfacción}) \quad (8)$$

Donde $n\text{Correcciones}$ es el número total de correcciones que el usuario hace de la cámara utilizando el interfaz hombre-máquina de la arquitectura. *Tiempo*, es el tiempo total que tarda el usuario en completar una fase. Por último, *satisfacción*, es una variable cualitativa que mide cómo de satisfecho está el usuario tras haber completado la fase. El modelo de lógica difusa ha sido diseñado de manera que la satisfacción del usuario predomine sobre las otras dos variables. El tiempo y el número de correcciones informan si el comportamiento de la cámara ha ayudado al cirujano durante la tarea. Sin embargo, estas dos variables dependen de la destreza del cirujano y de las condiciones particulares de cada tarea.

En la Figura 7 se puede ver gráficamente todo el proceso de aprendizaje que se acaba de explicar.

4 RESULTADOS

El robot cámara y la arquitectura cognitiva presentados en este artículo han sido testeados y evaluados haciendo uso de la plataforma robótica quirúrgica CISOBOT, desarrollada por la Universidad de Málaga [23]. Esta plataforma está formada por dos brazos robóticos de 6 DoFs. A los efectores finales de los mismos se han conectado dos

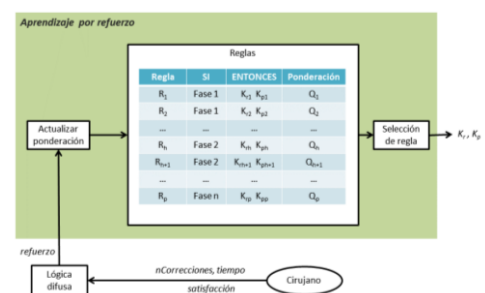


Figura 7. Algoritmo de aprendizaje por refuerzo.

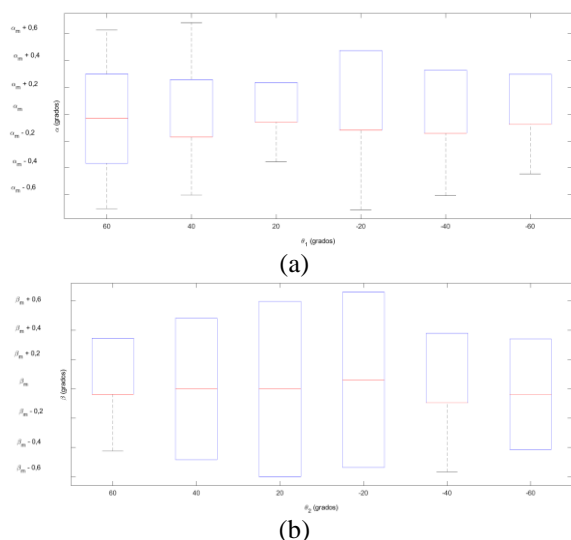


Figura 8. Distribuciones para los datos experimentales del análisis de repetitividad: (a) rotación; (b) inclinación.

herramientas quirúrgicas de agarre comerciales, previamente motorizadas para automatizar la apertura y cierre. Para teleoperar estas dos herramientas se han utilizado dos dispositivos hápticos. Por otro lado, el robot que controla los movimientos del robot cámara es una Barret WAM (Barrett Technology, Inc.), un brazo de 7 DoFs con baja fricción y baja inercia. Toda la arquitectura ha sido montada en ROS (Robotic Operating System) y utilizando como base cognitiva SOAR [24], una arquitectura cognitiva de propósito general.

Se han realizado dos tipos de experimentos, uno encaminado al análisis del robot cámara y otro para testear y comprobar la estrategia de navegación de la cámara dentro la arquitectura cognitiva. A continuación, se detalla los experimentos realizados y los resultados de los mismos.

4.1 ANÁLISIS DEL ROBOT CÁMARA

Este experimento va encaminado al estudio del comportamiento de los grados de libertad internos del robot cámara. El control interno de la rotación (α) y la inclinación (β) se realiza a través de un bucle abierto lo que impide medir la orientación de la cámara en un escenario real. Debido a esto, el comportamiento de estos movimientos ha sido estudiado a través de un análisis de repetitividad. En concreto, se han seleccionado 6 posiciones de los motores 1 y 2: θ_1 y θ_2 . Cada una de estas posiciones se ha repetido 10 veces y se ha medido el valor de α y β para cada una de ellas. Las posiciones elegidas fueron: $\pm 60^\circ$, $\pm 40^\circ$, y $\pm 20^\circ$. En la Figura 8 se ve la distribución de los datos obtenidos, donde α_m y β_m representan el valor medio de α y β respectivamente. Como se puede observar los valores medidos están

dentro del rango $[\alpha_m - 0.7, \alpha_m + 0.7]$ y $[\beta_m - 0.6, \beta_m + 0.65]$. Teniendo en cuenta que el valor máximo para estos parámetros es de ± 30 grados, el máximo error es de 2.3% para α y 2% para β . Estos errores son aceptables para mover la cámara dentro del ámbito quirúrgico, ya que este tipo de tareas no necesitan una precisión demasiado elevada. De hecho, posicionando la cámara a 10cm de altura, un error de 0.7° en la orientación se traduce en un error de 1.22mm en el área mostrada por la cámara, lo que se puede considerar despreciable.

4.2 ESTRATEGIA DE NAVEGACIÓN

El objetivo de este experimento es probar la estrategia de navegación del robot cámara propuesto en este artículo. El experimento se basa en la primera tarea del manual SAGES para cirugía laparoscópica [25]. El principal objetivo de esta tarea es ejercitar la percepción en un escenario 2D, por lo que es adecuada para validar si la estrategia de navegación propuesta ayuda a los cirujanos o no. El escenario del experimento se puede ver en la Figura 9, éste es un tablero de clavijas comercial con dos anillos de goma (Anillo 1 y 2) y marcas de colores para identificar las distintas áreas de interés dentro del tablero. El experimento consiste en coger y ubicar en clavijas determinadas cada uno de los anillos. Siendo la secuencia de acciones la siguiente:

- *Estado 1.* Coger el anillo 1 de la clavija 1 con la herramienta izquierda.
- *Estado 2.* Transferir el anillo 1 de la herramienta izquierda a la derecha.
- *Estado 3.* Colocar el anillo 1 en la clavija 4.
- *Estado 4.* Coger el anillo 2 de la clavija 3 con la herramienta derecha.
- *Estado 5.* Transferir el anillo 2 de la herramienta derecha a la izquierda.
- *Estado 6.* Colocar el anillo 2 en la clavija 2.

Durante la realización de esta tarea el robot cámara se mueve de manera autónoma según la estrategia descrita en este artículo. Si el usuario no se encuentra cómodo con la vista presentada, puede modificarla a través del interfaz hombre-máquina también incluido en la arquitectura.

El experimento ha sido realizado por usuarios inexpertos y con el algoritmo de aprendizaje por refuerzo habilitado, de manera que la aportación de la estrategia reactiva y proactiva se adapte a cada uno de los usuarios. El objetivo de este experimento es analizar si la navegación aprende los parámetros K_r y K_p que maximizan el refuerzo obtenido en cada acción decidida por la arquitectura. Cada usuario ha realizado 15 repeticiones de la tarea anteriormente descrita. Los valores asociados al algoritmo de Q -



Figura 9. Vista inicial del experimento de navegación.

learning (ecuación (7)) elegidos son: $\tau = 0.3$ y $\mu = 0.9$. Estos valores han sido elegidos para que la información ya obtenida prevalezca sobre la nueva. En cuanto al parámetro asociado a la política ε -greedy, se ha elegido $\varepsilon = 0.4$, para las 10 primeras repeticiones y $\varepsilon = 0.2$, para las restantes. De esta manera, inicialmente se favorece la exploración de nuevos valores y para finalizar se explotan los datos ya conocidos.

La Figura 10 muestra los valores de K_r ($K_p = 1 - K_r$) para cada usuario, definidos como la moda estadística de los resultados obtenidos en las 15 repeticiones. Se puede observar como los estados 1, 3, 4 y 6 tienen valores de K_r por debajo de 0.5. En estos casos los usuarios prefieren un control proactivo al reactivo. Sin embargo, en los estados 2 y 5 los valores K_r de están cercanos a la unidad, lo que implica que los cirujanos prefieren en estos casos un seguimiento del instrumental. También se puede observar como el valor K_r de es ligeramente distinto para cada usuario, debido a las preferencias particulares de cada uno.

Por otro lado, la Figura 11 muestra la frecuencia de aparición a lo largo de todo el experimento del valor de K_r que el sistema finalmente aprende para cada usuario. La barra roja representa la frecuencia global a lo largo de los 15 experimentos. Las otras tres barras representan la evolución de este porcentaje a lo largo del experimento. Como se puede observar, durante las cinco primeras repeticiones, la frecuencia de aparición del valor final de K_r elegido por el sistema es baja. Conforme el sistema va aprendiendo, en sucesivas repeticiones, se puede observar como dicha frecuencia aumenta, siendo máxima en las últimas 5 repeticiones, donde el sistema ha aprendido por completo el comportamiento con el que el usuario se siente más cómodo.

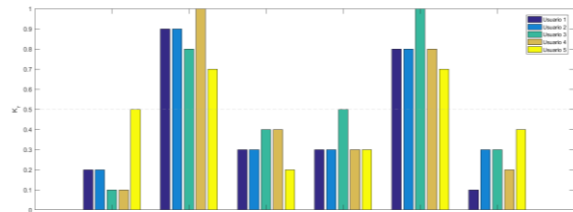


Figura 10. Valores de K_r aprendidos.

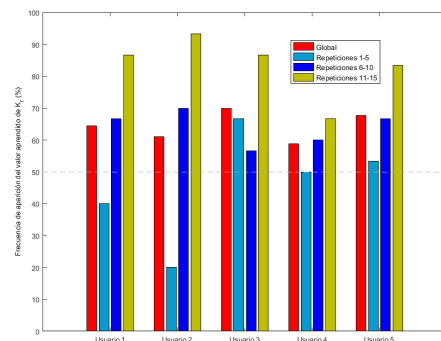


Figura 11. Frecuencia de aparición del valor aprendido de K_r .

5 CONCLUSIONES

Este artículo ha presentado el diseño mecánico y la arquitectura cognitiva de un novedoso concepto de asistente robótico camarógrafo. Éste está compuesto por un dispositivo intra-abdominal que contiene una cámara de alta resolución con un acople magnético que se conecta a un robot externo para su movimiento. Un novedoso mecanismo de cableado permite mover en rotación e inclinación la cámara.

La arquitectura cognitiva que controla el movimiento autónomo del robot cámara proporciona una estrategia de navegación con flexibilidad suficiente como para adaptarse a distintos usuarios y reaccionar ante situaciones imprevistas. Los resultados experimentales muestran como el punto de vista proporcionado por el robot cámara ayuda a los usuarios a realizar las tareas quirúrgicas.

Referencias

- [1] V. Karimyan, M. Sodergren, J. Clark, G.Z. Yang, and A. Darzi, "Navigation systems and platforms in natural orifice transluminal endoscopic surgery (NOTES)," *Int. Journal of Surgery*, vol. 7, no. 4, pp.297-304, 2009.
- [2] T. Hu, P.K. Allen, N.J. Hogle, D.L. Fowler, "Insertable surgical imaging device with pan, tilt, zoom and lighting," *Int. Journal of Robotics Research*, vol. 28, no. 10, pp. 1373-1389, Oct. 2009.

- [3] C.A. Castro, S. Smith, A. Alqassis, T. Ketterl, Y. Sun, S. Ross, A. Rosemurgy, P.P. Savage, R.D. Gitlin, "MARVEL: a wireless miniature anchored robotic videoscope for expedited laparoscopy," *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 2012, pp. 2926-2931.
- [4] Valdastrì P, Quaglia C, Buselli E, Arezzo A, Di Lorenzo N, Morino M, Menciassi, P. Dario, "A magnetic internal mechanism for precise orientation of the camera in wireless endoluminal applications," *Endoscopy*, vol. 42, no. 6, pp. 481-486, 2010.
- [5] A.C. Lehman, J. Dumpert, N.A. Wood, L. Redden, A.Q. Visty, S. Farritor S, B. Varnell, D. Oleynikov, "Natural Orifice Cholecystectomy Using a Miniature Robot," *Surg Endosc*, vol. 23, pp.260-266, 2009.
- [6] J. Cadetdu, R. Fernandez, M. Desai, R. Bergs, C. Tracy, S.J. Tang, P. Rao, M. Desai, D. Scott, "Novel Magnetically Guided Intra-abdominal Camera to Facilitate Laparoendoscopic Single-Site Surgery: initial human experience," *Surg Endosc*, vol. 23, no. 8, pp.1894-1899, 2009.
- [7] M. Fakhry, B. Gallagher, F. Bello, G.B. Hanna, "Visual Exposure Using Single-Hand Magnet-Driven Intra-abdominal Wireless Camera in Minimally Access Surgery," *Surg Endosc*, vol. 23, pp. 539-543, 2009.
- [8] M. Simi, M. Silvestri, C. Cavallotti, M. Vatteroni, P. Valdastrì, A. Menciassi, P. Dario, "Magnetically Activated Stereoscopic Vision System for Laparoscopic Single-Site Surgery," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 18, no. 3, pp. 1140-1151, 2013.
- [9] R.H. Taylor, P. Kazanzides, "Medical Robotics and Computer-Integrated Interventional Medicine", *Adv. in Computers*, vol. 73, pp. 219-260, 2008.
- [10] M. Azizian, M. Khoshnam, N. Najmaei, R.V. Patel, "Visual servoing in medical robotics: A survey. Part I: Endoscopic and direct vision imaging—Techniques and applications," *Int. J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg*, vol. 11, no. 1, pp. 67-79, 2013.
- [11] A. Casals, J. Amat, and E. Laporte, "Guidance of an assistant robot in laparoscopic surgery," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 1, Apr 1996, pp. 895–900.
- [12] O. Weede, A. Bihlmaier, J. Hutzl, B.P. Müller-Stich, H. Wörn, "Towards Cognitive Medical Robotics in Minimal Invasive Surgery" *Proc. of the Conf. on Adv. in Robotics*, 2013, pp. 1–8.
- [13] B.W. King, L.A. Reisner, A.K. Pandya, A.M. Composto, R.D. Ellis, M.D. Klein, "Towards an autonomous robot for camera control during laparoscopic surgery," *J. Laparoendosc. Adv. Surg. Tech.*, vol. 23, pp. 1027–1030, 2013.
- [14] J. Rosen, J.D. Brown, L. Chang, M.N. Sinanan, B. Hannaford, "Generalized approach for modeling minimally invasive surgery as a stochastic process using a discrete Markov model," *IEEE Trans Biomed Eng*, vol. 53, no. 3, pp. 399–413, 2006.
- [15] S.Y. Ko, J. Kim, D.S. Kwon, and W.J. Lee, "Intelligent interaction between surgeon and laparoscopic assistant robot system," *IEEE Int. Workshop on Robots and Human Interactive Communication*, pp. 60- 65, Oct. 2005.
- [16] I. Rivas-Blanco, B. Estebanez, M. Cuevas-Rodriguez, E. Bauzano, V.F. Muñoz, "Towards a cognitive camera robotic assistant," *IEEE RAS & EMBS Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechanics*, 2014, pp. 739-744.
- [17] A. Pandya, L. A. Reisner, B. King, N. Lucas, A. Composto, M. Klein, R.D. Ellis, "Review A Review of Camera Viewpoint Automation in Robotic and Laparoscopic Surgery", *Robotics*, vol. 3, pp. 310-329, 2014.
- [18] E. Bauzano, B. Estebanez, I. Garcia-Morales, and V.F. Muñoz- Martinez, "Collaborative Human-Robot System for HALS suture procedures" *IEEE Systems Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 957-966, 2014.
- [19] B. Estebanez, P. del Saz-Orozco, I. Rivas-Blanco, E. Bauzano, V.F. Muñoz, I. García-Morales, "Maneuvers recognition in laparoscopic surgery: artificial neural network and hidden Markov model approaches," *IEEE RAS/EMBS Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechanics*, 2012, pp. 1164-1169.
- [20] Y. Song, Y-B. Li, C-H. Li, G-F. Zhang, "An efficient initialization approach of Q-learning for mobile robots," *Int. Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 166-172, 2012.
- [21] M.L. Littman, "Value-function reinforcement learning in Markov games," *Journal of Cognitive Systems Research*, vol. 2, pp. 55-66, 2001.
- [22] M. Tokic, G. Palm, "Value-Difference Based Exploration: Adaptive Control between Epsilon-Greedy and Softmax," *Proc. of the 34th Annual German Conf. on Adv. in artificial intelligence*, Berlin, Germany, 2011, pp. 335-346.
- [23] C.J. Pérez-del-Pulgar, I. García-Morales, I. Rivas-Blanco, V.F. Muñoz, "Navigation method for teleoperated single-port access surgery with soft tissue interaction detection," *IEEE Systems Journal*, in press, 2016.
- [24] J. Laird, "Extending the Soar Cognitive Architecture", *Proc. of the first AGI conference*, 2008, pp. 224-235.
- [25] I. Choy, A. Okraïneç, "Fundamentals of laparoscopic surgery-FLS", *The SAGES manual of Quality, Outcomes and Patient Safety*, vol. 46, pp. 461-471, 2012.

CÁLCULO DE FUERZAS DE CONTACTO PARA PRENSIONES BIMANUALES

Abiud Rojas-de-Silva

Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials (IOC)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, francisco.abiud.rojas.de.silva@upc.edu

Raúl Suárez

Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials (IOC)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, raul.suarez@upc.edu

Resumen

En este artículo se presenta un método para calcular fuerzas de contacto para prensiones bimanuales. El método propuesto utiliza dos funciones de coste para optimizar la distribución de la fuerza de las manos con las que se realiza la prensión bimanual y para minimizar la fuerza ejercida por los dedos. Las funciones de coste y las restricciones del problema de optimización se han formulado en función de los torques de las articulaciones tomando como base la relación existente entre las fuerzas de contacto, la matriz jacobiana de la mano y los torques de las articulaciones. Adicionalmente se presenta un índice para medir la distribución de la fuerza entre las manos. El artículo incluye algunos ejemplos prácticos del enfoque propuesto.

Palabras clave: Fuerzas de contacto, prensiones bimanuales, optimización.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la manipulación de objetos realizado por seres humanos es un tópico que ha sido analizado a lo largo de varios años, cuyos resultados han generado una vasta fuente de conocimiento que ha sido utilizado en diferentes dominios, por ejemplo en el área de rehabilitación con el desarrollo de dispositivos protésicos y en el área de robótica con el diseño de dispositivos mecánicos para sujetar objetos, así como la implementación de estrategias teóricas para calcular configuraciones adecuadas para tales dispositivos a fin de sujetar los objetos de forma robusta.

El uso de dispositivos mecánicos, tales como pinzas o manos mecánicas para sujetar y manipular objetos conlleva el desarrollo de dos fases [4], la primera es la *síntesis de la prensión*, que consiste en encontrar los puntos de contacto sobre la superficie del objeto que sean alcanzables por la

mano, cumpliendo al mismo tiempo algunas restricciones básicas; la segunda fase puede denominarse como la *fase de sostenimiento* que consiste en mantener la prensión del objeto mientras es manipulado. Para ello es necesario calcular las fuerzas que los dedos de la mano deben ejercer sobre el objeto con la finalidad de contrarrestar las perturbaciones externas que pueden aparecer durante su manipulación. La fase de sostenimiento ha sido ampliamente estudiada, en la sección 2 se discuten algunos trabajos relacionados. Sin embargo, con el desarrollo de sistemas robóticos bimanuales equipados con manos antropomorfas se añade un grado de complejidad extra en la búsqueda de prensiones bimanuales y sus correspondientes fuerzas de contacto.

En este trabajo se presenta un método para calcular fuerzas de contacto para sistemas robóticos bimanuales considerando las limitaciones de torque en las articulaciones de las manos. Adicionalmente se propone un índice que describe la distribución de las fuerzas entre las manos del sistema bimanual.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

El cálculo de las fuerzas de contacto para compensar perturbaciones externas se ha abordado a través de diferentes enfoques. Uno de los primeros enfoques dio solución al problema utilizando la matriz de la prensión y descomponiendo las fuerzas de contacto en dos componentes: las fuerzas de manipulación y las fuerzas de prensión [16, 10]. Estas dos componentes son conocidas como las soluciones particular y homogénea del problema de las fuerzas de contacto para prensiones estáticas. Las fuerzas de contacto pueden encontrarse resolviendo la componente homogénea del problema, conocida también como *las fuerzas internas* de la prensión. Algunos investigadores han caracterizado estas fuerzas internas como enlaces virtuales con actuadores virtuales que representan el objeto sujetado de tal manera que cuando una fuerza

se aplica en cada uno de los puntos de contacto se generan fuerzas articulares en el mecanismo virtual [20, 22]. Muchos de los primeros trabajos que adoptaron el concepto de las fuerzas internas para calcular las fuerzas de contacto solo consideraban prensiones de precisión, i.e., contactando solo con la yema de los dedos [1, 6, 14]. Sin embargo en trabajos posteriores se demostró que en las prensiones envolventes (usando toda la mano y no solo la yema de los dedos) existen contactos que ejercen fuerzas no controlables sobre el objeto [2, 3]. Este hecho se ha analizado descomponiendo el espacio de fuerzas de contacto en cuatro subespacios que representan las fuerzas activas y pasivas y las fuerzas internas controlables y no controlables [23, 24, 25].

El uso de las fuerzas internas del objeto para calcular las fuerzas de contacto implica la formulación de un problema con una gran cantidad de variables y con un infinito número de posibles soluciones. Para hacer frente a este tipo de problemas se han utilizado diferentes tipos de optimización con la finalidad de obtener las fuerzas de contacto óptimas, o al menos encontrar una solución subóptima. La mayoría de los métodos de optimización utilizados han tenido que hacer frente a la no linealidad de los modelos de fricción de los contactos modelándolos como matrices de inecuaciones [8, 21], matrices simétricas [4] o bien modelando el problema entero de forma que cumpla los requerimientos necesarios para ser resuelto como un problema dual de programación lineal [7].

Uno de los principales retos en el cálculo de las fuerzas de contacto consiste en desarrollar métodos que permitan calcularlas tan rápido como sea posible de forma que puedan ser utilizados en aplicaciones de ejecución en tiempo real. Para ello se han utilizado enfoques de optimización convexa y optimización con gradientes que permiten encontrar soluciones óptimas o subóptimas con tiempos de computo relativamente pequeños [8, 13, 9, 5, 17].

El uso de métodos de optimización para calcular las fuerzas de contacto para sistemas bimanuales es un área de investigación activa debido a la complejidad que los sistemas bimanuales imponen, sin embargo los trabajos desarrollados en éste ámbito son escasos [12, 18]. Por tal motivo, en este trabajo se presenta un método para calcular las fuerzas de contacto para prensiones bimanuales utilizando un método de optimización lineal considerando las limitaciones de torque de las articulaciones de los dedos de las manos. Adicionalmente, se propone un índice para medir la distribución de las fuerzas entre las manos.

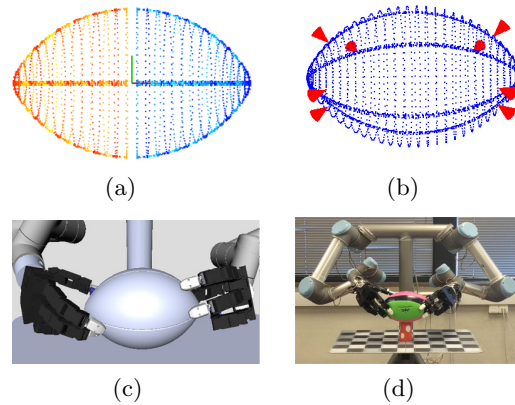


Figura 1: Planificador bimanual de prensiones basado en un método de segmentación por rebanadas. a) El objeto es segmentado en rebanadas. b) Puntos de contacto obtenidos. c) Simulación de la prensión bimanual. d) Ejecución de la prensión bimanual en un sistema real.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En un trabajo previo, se presentó un planificador de prensiones para objetos grandes utilizando sistemas bimanuales [15]. El alcance de ese trabajo incluye la búsqueda de los puntos de prensión para dos manos en objetos grandes a través de la segmentación del objeto en rebanadas (Ver Fig.1). Durante la experimentación real los puntos sobre el objeto que son el objetivo de contacto de las manos se proyectaron una cierta distancia hacia el interior siguiendo la dirección del vector normal de la superficie del objeto en tales puntos con la finalidad de generar fuerzas de contacto lo suficientemente grandes utilizando solo el control de la posición de los dedos. Con ese enfoque es posible que la contribución de la fuerza entre las manos no esté balanceada. Por lo tanto, el problema a resolver consiste en calcular fuerzas de contacto adecuadas para prensiones bimanuales con la finalidad de compensar perturbaciones externas durante la manipulación del objeto con una distribución uniforme de fuerzas entre las manos. Las suposiciones consideradas en el enfoque propuesto son las siguientes:

- Solo se consideran prensiones de precisión con contactos rígidos con fricción (Sin embargo, el enfoque puede ser adaptado fácilmente para ser utilizado contactos blandos).
- La fricción entre el objetos y los dedos de la mano se describe mediante el modelo de fricción de Coulomb.
- Ambas manos utilizan igual número de dedos.
- El torque máximo es el mismo para todas las articulaciones de los dedos.

- El peso del objeto es conocido, e inicialmente es la única fuerza a ser compensada por las fuerzas de prensión.

4. ENFOQUE PROPUESTO

Dado el peso del objeto, se deben hallar las fuerzas que los dedos de la mano deben ejercer sobre el objeto para contrarrestarlo. La ecuación general que describe dicho balance de fuerzas se puede expresar como:

$$\mathbf{G}\mathbf{F} = -\mathbf{w}_e \quad (1)$$

donde $\mathbf{F} = \{\mathbf{f}_1, \dots, \mathbf{f}_n\}^T$ es el vector de fuerzas aplicadas por los n dedos sobre el objeto, \mathbf{G} es la matriz de grasp y \mathbf{w}_e es la fuerza generalizada externa producida por el peso del objeto que debe ser compensado.

Con la finalidad de encontrar \mathbf{F} , se propone optimización con dos diferentes funciones de coste, una para minimizar la norma infinito (L_∞) del cociente entre los torques de las articulaciones de los dedos para una configuración dada y el máximo torque articular, y la segunda función para minimizar la norma de mínimos cuadrados (L_2) de los torques articulares de los dedos para una configuración dada, con la finalidad de balancear las fuerzas entre las manos y minimizar la fuerza ejercida por los dedos.

4.1. FORMULACIÓN DE LAS RESTRICCIONES DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

Cuando una prensión es redundante (i.e., el número de puntos de contacto es mayor que el mínimo necesitado para sujetar un objeto), como en el caso de las prensiones bimanuales con mas de dos dedos por mano, existen infinitas combinaciones de fuerzas que podrían compensar una perturbación externa dada, sin embargo no todas esas combinaciones de fuerzas pueden ser ejercidas por los dedos. Con la finalidad de determinar las fuerzas que cada dedo puede ejercer, se considera una hiperesfera en el espacio del torque articular expresada por:

$$\boldsymbol{\tau}_i^T \boldsymbol{\tau}_i = 1 \quad (2)$$

donde $\boldsymbol{\tau}_i \in \mathbb{R}^m$ es el vector de los torques articulares del i -ésimo dedo con m articulaciones. La relación entre

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{J}_i^T \mathbf{f}_i \quad (3)$$

donde \mathbf{J}_i y \mathbf{f}_i son la matriz Jacobiana y la fuerza aplicada por el i -ésimo dedo, proyecta la esfera

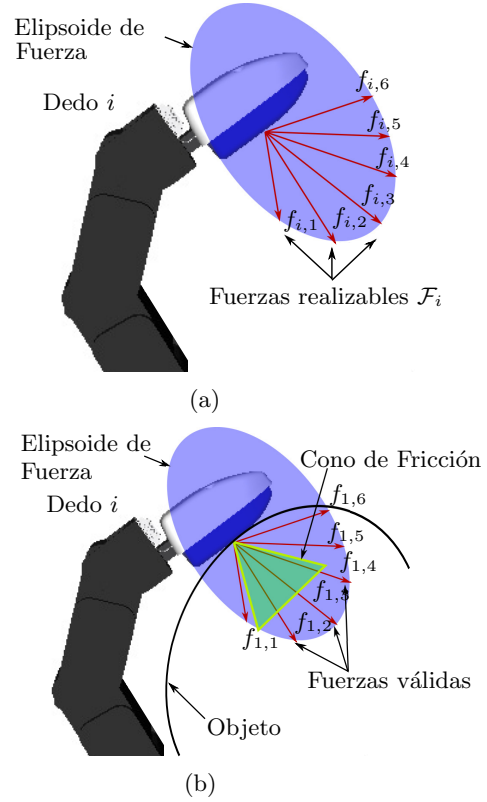


Figura 2: a) Ejemplo ilustrativo de las fuerzas realizables pertenecientes al Elipsoide de Fuerza de un dedo para una configuración articular dada y $|\boldsymbol{\tau}_i| \leq 1$. b) Fuerzas realizables válidas para un coeficiente de fricción dado.

unitaria de torque en un elipsoide en el espacio de fuerzas de las yemas de los dedos,

$$\mathcal{F}_i^T \mathbf{J}_i \mathbf{J}_i^T \mathcal{F}_i = 1 \quad (4)$$

El elipsoide representado en (4) indica las fuerzas $\mathcal{F}_i = \{\mathbf{f}_{i,1}, \dots, \mathbf{f}_{i,\infty}\}$ que cada dedo puede ejercer con un conjunto de torques $|\boldsymbol{\tau}_i| \leq 1$ para una configuración dada (ver Fig.2-a). Por lo tanto, si se conoce el máximo torque de las articulaciones de un dedo, es posible calcular la fuerza \mathbf{f}_i que éste puede hacer para una configuración específica a través de:

$$\mathbf{f}_i = (\mathbf{J}_i^\dagger)^T \boldsymbol{\tau}_i \quad (5)$$

donde \mathbf{J}_i^\dagger es la matriz pseudo inversa de \mathbf{J}_i . Dado que \mathbf{F} in eq. (1) representa las fuerzas ejercidas por n dedos, eq. (5) se puede extender de manera que:

$$\mathbf{F} = (\mathcal{J}^\dagger)^T \boldsymbol{\tau} \quad (6)$$

donde $\mathcal{J}^\dagger = \text{diag}(\mathbf{J}_1^\dagger, \dots, \mathbf{J}_n^\dagger)$ es la matriz diagonal a bloques de las matrices jacobianas pseudo invertidas de n dedos y $\boldsymbol{\tau} = \{\boldsymbol{\tau}_{1,1}, \dots, \boldsymbol{\tau}_{n,m}\}^T$ es el vector que contiene los torques articulares de los n dedos.

Reemplazando eq. (6) en eq. (1) es posible contrarrestar \mathbf{w}_e considerando el espacio del torque articular:

$$\mathbf{G}(\mathcal{J}^\dagger)^T \mathcal{T} = -\mathbf{w}_e \quad (7)$$

Adicionalmente, para evitar que los dedos se deslicen sobre el objeto como consecuencia de las fuerzas aplicadas, éstas deben estar dentro de los correspondientes conos de fricción (ver Fig. 2-b) definidos por:

$$\frac{\mathbf{f}_i}{\|\mathbf{f}_i\|} \cdot \hat{\mathbf{n}}_i \geq \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} \quad (8)$$

donde $\hat{\mathbf{n}}_i$ es la normal unitaria en el i -ésimo punto de contacto y μ es el coeficiente de fricción entre los dedos y el objeto. Por conveniencia, eq. (8) puede expresarse como:

$$\mathbf{f}_i^T (I - (1 + \mu^2) \hat{\mathbf{n}}_i \cdot \hat{\mathbf{n}}_i^T) \mathbf{f}_i \leq 0 \quad (9)$$

y extendiendo la ineq (9) para los n dedos se obtiene:

$$\mathbf{F}^T (I - (1 + \mu^2) \mathcal{N}) \mathbf{F} \leq 0 \quad (10)$$

donde $\mathcal{N} = \text{diag}(\hat{\mathbf{n}}_1 \cdot \hat{\mathbf{n}}_1^T, \dots, \hat{\mathbf{n}}_n \cdot \hat{\mathbf{n}}_n^T)$ es la matriz diagonal a bloques de $\hat{\mathbf{n}}_i \cdot \hat{\mathbf{n}}_i^T$ de los n dedos.

Usando la eq. (6), la eq. (10) puede ser reformulada como:

$$\mathcal{T}^T \mathbf{B} \mathcal{T} \leq 0 \quad (11)$$

donde $\mathbf{B} = \mathcal{J}^\dagger (I - (1 + \mu^2) \mathcal{N}) (\mathcal{J}^\dagger)^T$.

Si se formula un problema de optimización para balancear la contribución de fuerza entre las manos o para minimizar la fuerza ejercida por los dedos en función de los torques articulares, las eq. (7) y (11) pueden ser utilizadas como restricciones del problema y el máximo torque articular τ_{max} puede utilizarse como límites superiores e inferiores de las variables que se optimizarán, de forma que el problema de optimización puede ser expresado como:

$$\begin{aligned} & \underset{\mathcal{T}}{\text{minimizar}} \quad \Phi \\ & \text{sujeto a} \quad -\tau_{max} \leq \mathcal{T} \leq \tau_{max} \\ & \quad \mathcal{T}^T \mathbf{B} \mathcal{T} \leq 0 \\ & \quad \left\| \mathbf{G}(\mathcal{J}^\dagger)^T \mathcal{T} + \mathbf{w}_e \right\|^2 = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

donde Φ es una representación genérica de una función de coste.

4.2. FUNCIONES DE COSTE

Dos funciones de coste diferentes fueron seleccionadas para realizar la optimización de las fuerza

de contacto. La primera permite una distribución uniforme de las fuerza entre los dedos de las manos, lo que significa que para una prensión bimanual si cada mano usa el mismo número de dedos, las fuerzas que aportan las mano deberían estar balanceadas. Esta función de coste está basada en la minimización de la norma infinito (L_∞) del vector de torque \mathcal{T} dividido entre el máximo torque articular τ_{max}

$$\Phi_0 = \left\| \frac{\mathcal{T}}{\tau_{max}} \right\|_{L_\infty} \quad (13)$$

La segunda función de coste permite minimizar la magnitud del vector de torques \mathcal{T} que eventualmente podría minimizar las fuerzas ejercidas por los dedos. Sin embargo, a diferencia de la primera función de coste, ésta no puede asegurar una distribución proporcional de las fuerzas entre los dedos de las manos. Esta función de coste está basada en la minimización de la norma de mínimos cuadrados (L_2) del vector de torque \mathcal{T} ,

$$\Phi_1 = \|\mathcal{T}\|_{L_2} \quad (14)$$

Para resolver el problema con el menor tiempo de computo posible, se utilizó un algoritmo basado en gradientes descendentes [19] implementado en el paquete NLOpt [11]. Por tal motivo es necesario formular los gradientes de las funciones de coste y de las restricciones del problema calculando sus derivadas parciales en función de \mathcal{T} .

El gradiente de la función de coste Φ_0 es:

$$\nabla \Phi_0 = \begin{cases} \frac{\tau_i}{\tau_{max}}, & \text{if } \tau_i = \tau_{max_i}, \\ 0, & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (15)$$

y el gradiente de la función de coste Φ_1 es:

$$\nabla \Phi_1 = 2\mathcal{T} \quad (16)$$

y los gradientes de las restricciones de la eq. (12) son:

$$\begin{aligned} \nabla c_1 &= 2\mathcal{T}^T \mathbf{B} \\ \nabla c_2 &= 2(\mathbf{G}(\mathcal{J}^\dagger)^T \mathcal{T} + \mathbf{w}_e)^T \mathbf{G}(\mathcal{J}^\dagger)^T \end{aligned} \quad (17)$$

4.3. INDICE DE DISTRIBUCIÓN DE FUERZA

Con la finalidad medir la distribución de fuerzas entre las manos que intervienen en una prensión bimanual se ha propuesto el Índice de Distribución de Fuerza (IDF):

$$FDI = \frac{H_1^f}{H_2^f} \quad (18)$$

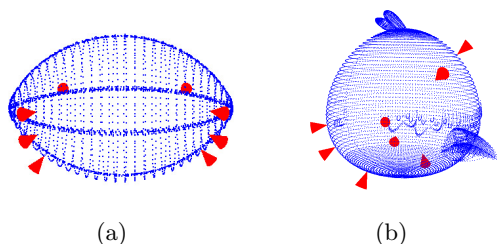


Figura 3: Puntos de contacto para un balón de rugby y un juguete.

donde $H_j^f = \sum_{i=0}^{n/2} \|f_i\|$ es la suma de las magnitudes de las fuerzas ejercidas por los dedos de la mano j , $j \in \{1, 2\}$ con $j = 1$ correspondiente a la mano con la menor sumatoria, i.e $H_1^f < H_2^f$. IDF indica la distribución de la fuerza entre las manos, cuando este índice tiende a uno significa que las fuerzas están balanceadas entre las dos manos y tiende a cero cuando la contribución de fuerza de cada mano está en desequilibrio.

5. EXPERIMENTACIÓN

Para demostrar el desempeño del enfoque propuesto, se han usado dos objetos, un balón de rugby y un juguete. Para cada objeto se calculó una prensión bimanual (ver Fig. 3-a y 3-b). Para cada prensión se calcularon las fuerzas de contacto optimizando las funciones de coste Φ_1 y Φ_2 con el peso original del objeto. Posteriormente se recalcularon las fuerzas de contacto en 9 ocasiones añadiendo 100 g al peso del objeto en cada una.

Las Tablas 1 y 2 muestran las fuerzas de contacto resultantes para contrarrestar las fuerzas generalizadas $w_e^{Rug} = [0, 0, -2,13858, 0, 0, 0]^T$ y $w_e^{Toy} = [0, 0, -3,500, 0, 0, 0]^T$ causados por el peso del balón de rugby y el juguete respectivamente.

El tiempo promedio para calcular las fuerzas de contacto es de 150 y 1500 ms, respectivamente para cada objeto.

La Fig. 4 muestra la contribución de fuerza de cada mano así como el Índice de Distribución de Fuerza (IDF) resultantes después de optimizar Φ_0 y Φ_1 para la prensión bimanual del balón de rugby y del juguete. En las figuras 4-a y 4-b, se muestran las contribuciones de fuerza para las prensiones bimanuales correspondientes a cada objeto. En ellas se muestran cuatro líneas: dos líneas continuas coloreadas en rojo y azul representan la contribución de fuerza de la mano izquierda y derecha respectivamente obtenidas a través de la optimización de la función de coste Φ_0 y dos líneas punteadas coloreadas en magenta y cyan representan la distribución de las

fuerzas utilizando la función de coste Φ_1 . Como se puede apreciar, las líneas continuas presentan un patrón similar en cada iteración, indicando una distribución uniforme de las fuerzas entre las dos manos. Por otra parte, las líneas punteadas muestra una disparidad considerable entre ellas, sin embargo las magnitudes de las fuerzas son menores en comparación con las observadas en las líneas continuas.

Las figuras 4-c y 4-d, muestran el IDF para las dos funciones de coste. La línea roja representa los resultados obtenidos con Φ_0 y la línea azul los obtenidos con Φ_1 . La línea roja siempre se encuentra por encima de 0.8 indicando que existe una buena distribución de fuerzas entre las manos que realizan la prensión bimanual, lo cual es coherente con los resultados mostrados por las líneas continuas azul y roja en las gráficas 4-a y 4-b). Sin embargo, la línea azul está por debajo de 0.5 en casi todos los casos, indicando una pobre distribución de fuerza entre las manos. Debido a que la configuración articular de las manos depende de la localización de los puntos de contacto sobre el objeto, la aportación de fuerza que cada mano puede hacer puede variar considerablemente. Por lo tanto si la prensión bimanual es simétrica las contribuciones de fuerza de las manos serán proporcionales obteniendo un IDF muy cercano a 1.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se ha presentado un método para optimizar las fuerzas de contacto para prensiones bimanuales considerando los límites de los torques articulares de las manos. El método está basado en la optimización de la distribución de fuerzas entre las manos y la minimización de las fuerzas ejercidas por los dedos. La optimización se realizó utilizando dos funciones de coste diferentes. La primera minimiza permite balancear la contribución de fuerza entre las manos que intervienen en una prensión bimanual. La segunda función de coste minimiza los torques articulares lo que eventualmente podría minimizar las fuerzas ejercida por los dedos de las manos.

Adicionalmente, se ha presentado un Índice de Distribución de Fuerza para medir el grado de distribución de la fuerza entre las manos que intervienen en una prensión bimanual.

Los experimentos muestran buenos resultados utilizando cualquiera de las dos funciones de coste, con un tiempo de computo promedio de 150 y 1500 ms para cada objeto respectivamente. Finalmente el IDF ha mostrado que la función de

Tabla 1: Fuerzas de contacto resultantes para compensar el peso $\mathbf{w}_e = [0, 0, -2,13858, 0, 0, 0]^T$ del balón de rugby

\mathbf{f}^T	x	y	z	m_x	m_y	m_z
\mathbf{f}_1^T	1.682	-1.824	-0.903	-0.009	-0.040	0.063
\mathbf{f}_2^T	1.326	0.204	0.061	0.005	-0.013	-0.060
\mathbf{f}_3^T	-0.444	5.552	0.594	0.347	0.057	-0.270
\mathbf{f}_4^T	-0.504	-3.376	1.043	-0.223	0.068	0.112
\mathbf{f}_5^T	0.979	-1.378	1.945	0.132	-0.055	-0.105
\mathbf{f}_6^T	-1.435	1.792	-0.182	-0.058	-0.030	0.158
\mathbf{f}_7^T	-2.023	2.605	-0.950	-0.035	0.060	0.239
\mathbf{f}_8^T	0.419	-3.575	0.531	-0.164	-0.040	-0.143
$(\Sigma \mathbf{f})_{Rug}^T$	0.000	0.000	2.139	-0.004	0.006	-0.006
\mathbf{w}_e^{Rug}	0.000	0.000	-2.138	0.000	0.000	0.000

Tabla 2: Fuerzas de contacto resultantes para compensar el peso $\mathbf{w}_e = [0, 0, -3,500, 0, 0, 0]^T$ del juguete

\mathbf{f}^T	x	y	z	m_x	m_y	m_z
\mathbf{f}_1^T	1.838	-1.307	-0.618	0.525	-0.054	0.224
\mathbf{f}_2^T	0.955	0.364	0.269	0.047	0.019	-0.234
\mathbf{f}_3^T	-1.471	0.108	1.170	0.008	0.086	-0.010
\mathbf{f}_4^T	-1.320	0.304	0.822	-0.048	0.043	-0.102
\mathbf{f}_5^T	1.531	1.321	-0.222	-0.047	0.036	0.168
\mathbf{f}_6^T	-1.282	0.130	0.572	0.030	-0.032	0.076
\mathbf{f}_7^T	-0.148	-0.183	1.238	0.002	-0.082	-0.007
\mathbf{f}_8^T	-0.102	-0.737	0.218	-0.517	-0.010	-0.120
$(\Sigma \mathbf{f})_{Toy}^T$	0.001	-0.001	3.449	0.003	0.007	-0.005
\mathbf{w}_e^{Toy}	0.000	0.000	-3.500	0.000	0.006	-0.006

coste Φ_0 efectivamente permite una distribución uniforme de las fuerzas entre las manos. Por otra parte, utilizando la función de coste Φ_1 el IDF muestra una pobre distribución de fuerzas entre las manos. Sin embargo Φ_1 muestra que la fuerzas ejercidas son menores que las obtenidas a través de la optimización de Φ_0 .

Vale la pena remarcar que cuando los puntos de prensión de cada mano se encuentran distribuidos sobre el objeto de forma simétrica, el IDF podría alcanzar fácilmente valores muy cercanos a uno. Sin embargo, cuando la prensión bimanual no es simétrica, la distribución de la fuerza podría no estar totalmente balanceada pero existe un comportamiento uniforme en la contribución de fuerza de cada mano, es decir, que la fuerza ejercida por cada mano aumenta o disminuye proporcionalmente de acuerdo con la magnitud de la fuerza externa que actúa sobre el objeto.

Como trabajo futuro se planea: 1) implementar el enfoque propuesto junto con un controlador híbrido de posición-fuerza con la finalidad de realizar experimentación real, y, 2) generalizar el enfoque propuesto a casos en donde cada mano usa diferente número de dedos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Gobierno de España a través de los proyectos DPI2013-40882-P y DPI2016-80077-R. A. Rojas-de-Silva fue parcialmente apoyado por la beca doctoral mexicana CONACyT 313768.

Referencias

- [1] M. Aicardi, G. Cannata, and G. Casalino. Grasp force planning for the coordinated Manipulation of Rigid Objects. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 1525–1530, May 1992.
- [2] A. Bicchi. Force distribution in multiple whole-limb manipulation. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, volume 2, pages 196–201, May 1993.
- [3] A. Bicchi and D. Prattichizzo. New Issues in the Kineto-Statics, Dynamics, and Control of Whole-Hand Manipulation. In T. Takamori and K. Tsuchiya, editors, *Robotics, Mechatronics and Manufacturing*

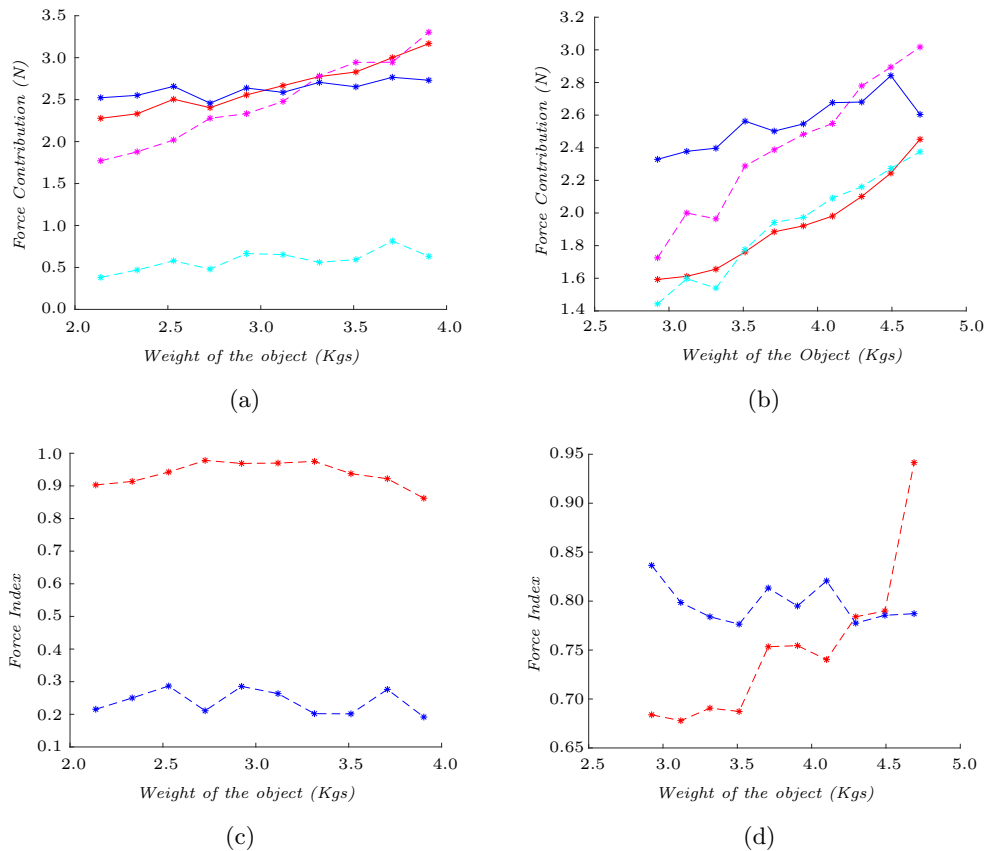


Figura 4: Gráficas de los resultados de la optimización de las fuerzas utilizando las funciones de coste Φ_0 y Φ_1 . a) y b) Contribución de fuerzas de cada mano para la presión correspondiente al balón de rugby y del juguete respectivamente: Las líneas continuas coloreadas en rojo y azul representan las contribuciones de fuerza de cada mano obtenidas a través de la optimización de Φ_0 y las líneas punteadas coloreadas en magenta y cyan representa las contribuciones de fuerzas obtenidas a través de la optimización de Φ_1 . c) y d) Índice de Distribución de Fuerza (IDF), la línea roja muestra los resultados obtenidos utilizando la función de coste Φ_0 y la línea azul muestra los resultados obtenidos utilizando la función de coste Φ_1 .

- Systems*, pages 373–3790. North Holland, Amsterdam, 1993.
- [4] M. Buss, H. Hashimoto, and J. B. Moore. Dextrous Hand Grasping Force Optimization. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(3):406–418, Jun 1996.
- [5] M. Buss, L. Faybusovich, and J. B. Moore. Dikin-type algorithms for dextrous grasping force optimization. *International Journal of Robotic Research*, 17(8):831–839, 1998.
- [6] D. P. Chevallier and S. Payandeh. On Computing the Friction Forces Associated with Three-Fingered Grasp. *International Journal of Robotics Research*, 13(2):119–126, 1994.
- [7] J. Cornella, R. Suárez, R. Carloni, and C. Melchiorri. Grasping force optimization using dual methods. In *8th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC)*, volume 39, pages 629–634, 2006.
- [8] L. Han, J. C. Trinkle, and Z. X. Li. Grasp analysis as linear matrix inequality problems. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16(6):663–674, Dec 2000.
- [9] U. Helmke, K. Hper, and J. B. Moore. Quadratically converget algorithms for optimal dextrous hand grasping. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 168(2):138–146, 2002.
- [10] Z. Ji and B. Roth. Direct Computation of Grasping Force for Three-Finger Tip-Prehension Grasps. *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, 110(4):405–413, Dic 1988.
- [11] S. G. Johnson. The nlopt nonlinear-optimization package. URL <http://ab-initio.mit.edu/nlopt>.
- [12] V. Lippiello, B. Siciliano, and L. Villani. A grasping force optimization algorithm for dextrous robotic hands. In *IEEE International Conference on Robotics and*

- Automation (ICRA)*, pages 4170–4175, May 2012.
- [13] G. Liu and Z. Li. Real-time grasping-force optimization for multifingered manipulation: theory and experiments. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 9(1):65–77, March 2004.
 - [14] B. Mirtich and J. Canny. Easily computable optimum grasps in 2-D and 3-D. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, volume 1, pages 739–747, May 1994.
 - [15] A. Rojas-de Silva and R. Suárez. Grasping bulky objects with two anthropomorphic hands. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 877–884, Oct 2016.
 - [16] J. K. Salisbury and B. Roth. Kinematic and Force Analysis of Articulated Mechanical Hands. *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, 105(1): 35–41, March 1983.
 - [17] J. P. Saut, C. Remond, V. Perdereau, and M. Drouin. Online computation of grasping force in multi-fingered hands. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 1223–1228, Aug 2005.
 - [18] A. M. Sundaram, O. Porges, and M. A. Roa. Planning realistic interactions for bimanual grasping and manipulation. In *IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pages 987–994, Nov 2016.
 - [19] K. Svanberg. A class globally convergent optimization methods based on conservative convex separable approximations. *SIAM Journal on Optimization*, 12(2):555–573, 2002.
 - [20] D. Williams and O. Khatib. The virtual linkage: a model for internal forces in multi-grasp manipulation. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, volume 1, pages 1025–1030, May 1993.
 - [21] Z. Xue, M. Schmidt, J. M. Zoellner, and R. Dillmann. Internal force computation of grasped object using joint torques. In *SICE Annual Conference*, pages 2795–2800, Aug 2008.
 - [22] T. Yoshikawa. Virtual truss model for characterization of internal forces for multiple finger grasps. In 3, editor, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2389–2395, May 1998.
 - [23] Y. Zhang and W. A. Gruver. Definition and force distribution of power grasps. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, volume 2, pages 1373–1378, May 1995.
 - [24] Y. Zhang and W. A. Gruver. Force distribution of power grasps based on the controllability of contact forces. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century*, volume 1, pages 83–88, Oct 1995.
 - [25] Y. Zhang, F. Gao, and W. A. Gruver. Determination of contact forces in grasping. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, volume 3, pages 1038–1044, Nov 1996.

Modelado del Contexto Geométrico para el Reconocimiento de Objetos

Jose-Raul Ruiz-Sarmiento, Cipriano Galindo, Javier Gonzalez-Jimenez
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Instituto de Investigación Biomédica de Málaga, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos, 29071, Málaga
{jotaraul,cgalindo,javiergonzalez}@uma.es

Resumen

El reconocimiento de objetos es una tarea clave para dotar de cierta autonomía a un robot móvil. Los métodos de reconocimiento tradicionales han alcanzado un éxito aceptable empleando información sobre la apariencia y/o la geometría de los objetos, aunque pueden presentar resultados ambiguos. Persiguiendo mitigar esta desventaja, en este trabajo se estudia cómo modelar información sobre el contexto geométrico de los objetos, la cual resulta útil para inclinar la balanza en reconocimientos ambiguos, de tal manera que se alcance un reconocimiento tan exitoso como sea posible. Para ello hemos recurrido a los Campos Aleatorios Condicionales como herramienta de modelado, y a Robot@Home como conjunto de datos para la evaluación. Con estas premisas se han alcanzado conclusiones interesantes para cualquier sistema reconocedor empleando información contextual.

Palabras clave: Reconocimiento de objetos, contexto geométrico, campos aleatorios condicionales, robots de servicio.

1 INTRODUCCIÓN

Para que un robot móvil pueda prestar servicios con éxito en su lugar de trabajo necesita alcanzar un cierto grado de comprensión sobre su entorno. El reconocimiento de objetos es una tarea clave para ello, ya que permite al robot interactuar con los elementos detectados en su alrededor. Este reconocimiento ha de ser fiable, ya que una clasificación errónea puede comprometer la integridad del robot, de su entorno, o incluso de seres humanos. Para visualizar esto, supóngase un robot encargado de proveer medicación a una persona mayor, de regar las plantas, o de planchar la ropa.

Los métodos de reconocimiento tradicionales que reconocen individualmente cada objeto en el entorno han alcanzado un éxito notable [1, 2, 3]. No obstante, estos métodos pueden a menudo ofrecer resultados ambiguos que comprometen la operación del robot, *p.e.* un objeto cilíndrico de

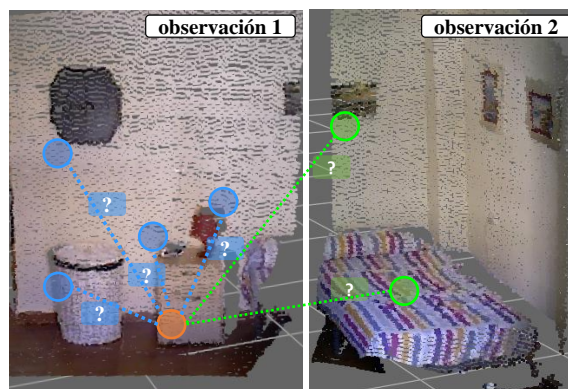


Figura 1: Ejemplo del problema del modelado contextual. En el caso de la mesa de noche (círculo naranja), sus relaciones de contexto (líneas azules y verdes) van a depender del rango de contexto empleado, y de la extensión de la información contextual a modelar.

tamaño medio podría ser reconocido como una papelería, un jarrón, una botella, etc [4]. Una manera de eliminar estas ambigüedades es la utilización de información sobre el contexto geométrico de los objetos: si hay una flor encima, probablemente sea un jarrón [5]. Esta fuente de información permite analizar las relaciones entre los objetos, y es de gran valor a la hora de reconocerlos.

Los *Campos Aleatorios Condicionales*, del inglés *Conditional Random Fields* (CRFs) [6], son una herramienta comúnmente usada para modelar y explotar información contextual. Estos modelos se basan en una representación en forma de grafo, donde los nodos son interpretados como objetos, y los arcos conectan nodos/objetos con una relación de contexto. Para crear dichos arcos se suele establecer un *rango de contexto*, que fija la distancia máxima a la que dos objetos pueden estar situados en el entorno para considerarse que existe una relación entre ellos. Por ejemplo, las relaciones que se muestran como líneas azules en la Fig. 1 se establecerán dependiendo de este rango de contexto. En la literatura también pueden encontrarse trabajos que consideran distintas fuentes de información contextual a modelar: proveniente de una observación del entorno (imagen de intensidad, RGB-D, etc.), donde esta información puede

ser escasa o pobre, o de una reconstrucción del mismo, lo que proporciona una mayor extensión de la información contextual (por ejemplo, las relaciones que aporta la imagen de la derecha en la Fig. 1, representada como líneas verdes). La elección del rango de contexto, o de la extensión de la información contextual, suelen hacerse de manera *ad-hoc* sin tener en cuenta sus posibles efectos en el reconocimiento.

Este trabajo persigue proveer indicaciones útiles y buenas prácticas sobre el modelado de información contextual, de tal manera que cualquier sistema reconocedor explotando esta fuente de información pueda alcanzar unos resultados tan exitosos como sea posible. Para ello se utilizan los CRFs como herramienta para el modelado y aprovechamiento del contexto, y se estudian principalmente los dos factores anteriormente citados, la elección i) del rango de contexto, y ii) de la extensión de la información a modelar. En dicho estudio se analiza la influencia de estos factores tanto en el éxito del reconocimiento, como en los tiempos de ejecución necesarios para los procesos de entrenamiento e inferencia sobre los CRFs, de tal manera que se pueda seleccionar la configuración que más se ajuste a las necesidades de cada aplicación. Para llevar a cabo los experimentos realizados durante el estudio se ha empleado el conjunto de datos *Robot@Home* [7], dada su complejidad y adecuación al problema: fue recogido por un robot móvil en entornos domésticos.

2 TRABAJOS RELACIONADOS

Los métodos de reconocimiento tradicionales han tenido un éxito notable en aplicaciones donde se especializan en detectar un cierto tipo de objeto (e.g. caras humanas [1]) o donde los objetos a reconocer aparecen aislados [2]. Ejemplos de estos métodos son los que emplean descriptores de la imagen como *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT) [8] o *Speeded-Up Robust Features* (SURF) [9], los cuales son explotados por clasificadores como las *Supported Vector Machines* (SVMs) [10] o las *Bag-of-Words* (BoW) [3]. No obstante, su rendimiento tiende a bajar en situaciones donde el número de posibles categorías a reconocer es elevado, o donde los objetos aparecen en escenas pobladas con múltiples objetos en diversas localizaciones y configuraciones, como es el caso de entornos humanos (oficinas, hogares, etc.) [4]. Uno de los principales motivos detrás de esta caída de rendimiento es la aparición de resultados ambiguos. No obstante, este fenómeno se puede paliar con la utilización de información sobre el contexto geométrico de los objetos [5].

Los *Modelos Gráficos Probabilísticos*, del inglés

Probabilistic Graphical Models (PGMs) [6], son utilizados en multitud de trabajos para modelar y explotar eficientemente dicho contexto. Para el caso del reconocimiento de objetos, los *Campos Aleatorios Condicionales* (del inglés *Conditional Random Fields*, CRFs), un tipo particular de PGM, han resultad especialmente exitosos. Estos modelos fueron empleados, por ejemplo, por Xiong y Huber [11] para el reconocimiento de los componentes básicos de un edificio: pared, suelo, techo, etc. Estos autores relacionan cada objeto con los k objetos más cercanos, sin importar la distancia a la que se encuentren, enfoque que puede dar lugar a relaciones poco relevantes o inexistentes. Por su parte, el CRF diseñado por Rogers y Christensen [12] incluye relaciones entre los objetos y las habitaciones donde se encuentran, pero no entre los propios objetos, desaprovechando una valiosa fuente de información. Otro trabajo relevante es el de Lin, Fidler y Urtasun [13], donde los objetos son representados por sus cajas delimitadoras, y se considera que están relacionados si estas cajas se encuentran a una distancia menor de 50 centímetros. Los autores del presente estudio también presentaron trabajos previos donde se empleó dicho rango de contexto (*p.e.* [14, 15]).

Quizás el trabajo más relacionado con el nuestro es el de Anand *et al.* [16], donde se usa un Campo Aleatorio de Markov (variante discriminativa de los CRFs) para reconocer objetos en entornos de oficinas y domésticos. En él se realiza un estudio superficial de la influencia del rango de contexto y de la extensión de la información contextual. En este trabajo se realiza un análisis más profundo de ambos factores, y también se estudia su repercusión en los tiempos de ejecución de los procesos de entrenamiento e inferencia de los CRFs.

3 LA HERRAMIENTA: CRFs APLICADOS AL RECONOCIMIENTO

La tarea del reconocimiento de objetos en una escena consiste en asignar categorías de un conjunto \mathcal{L} (*p.e.* mesa, maceta, cortina, cuadro, vaso, etc.) a las observaciones de los n objetos en la misma $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_n]$. Si se considera $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_n]$ como el vector de variables aleatorias que asignan a cada objeto en \mathbf{x} una categoría de \mathcal{L} , el problema del reconocimiento desde un punto de vista probabilístico se define como la búsqueda de la asignación a \mathbf{y} que maximiza la distribución de probabilidad condicionada $p(\mathbf{y}|\mathbf{x})$. Dada su complejidad, la definición exhaustiva de esta distribución no es factible. Es en este punto donde los CRFs nos ofrecen la posibilidad de representarla de tal manera que su computo pueda ser más eficiente.

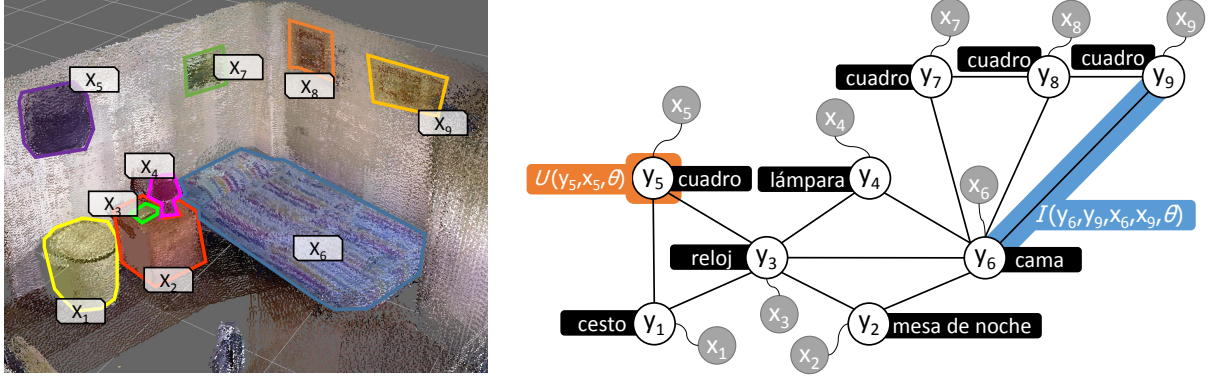


Figura 2: Izquierda, reconstrucción de una habitación con objetos segmentados (x_1, \dots, x_9) . Derecha, representación mediante un CRF en forma de grafo de dicha escena, donde aparece una variable aleatoria/nodo por cada objeto, y los objetos relacionados se conectan con un arco. Las formas naranjas representan el ámbito de un factor local, las azules de un factor por pares, y las negras son el resultado de un proceso de inferencia sobre el CRF.

Para ello, los CRFs emplean una representación en forma de grafo $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$, donde los nodos en \mathcal{V} se asocian con las variables aleatorias en \mathbf{y} , y los arcos en \mathcal{E} conectan nodos que guardan algún tipo de relación. En el caso del reconocimiento de objetos, los nodos se conectan acorde al contexto geométrico de sus objetos asociados. Así si dos objetos están situados *cerca* en la escena, se entiende que el reconocimiento de uno tiene influencia directa (y mutua) en la categorización del otro, conectándose sus nodos, mientras que si están alejados o en distintas habitaciones esta influencia no es tal. El cómo decidir si dos objetos están cerca es motivo de discusión en la Sec. 4.1.

Una vez construido el grafo \mathcal{G} que representa los objetos en el entorno del robot, la probabilidad $p(\mathbf{y}|\mathbf{x})$ se codifica sobre el mismo empleando el concepto de *factor*. Un factor puede interpretarse como una función definida sobre parte del grafo que codifica un pedazo de dicha probabilidad, siendo típicamente de dos tipos: *locales* y *por pares*. Los factores locales se refieren a un nodo del grafo, y establecen como de probable es para una variable aleatoria y_i el pertenecer a una categoría de \mathcal{L} de acuerdo a las características visuales y/o geométricas del objeto x_i . Por su parte, los factores por pares se definen sobre arcos, y determinan la compatibilidad de asignar dos categorías de \mathcal{L} a dos variables relacionadas y_i y y_j teniendo en cuenta x_i y x_j . Estos factores suelen modelarse como clasificadores lineales de la siguiente forma:

$$\mathcal{U}(y_i, x_i, \theta) = \sum_{l \in \mathcal{L}} \delta_{y_i=l} \theta_l \mathbf{f}_{x_i} \quad (1)$$

$$\mathcal{I}(y_i, y_j, x_i, x_j, \theta) = \sum_{l_1 \in \mathcal{L}} \sum_{l_2 \in \mathcal{L}} \delta_{y_i=l_1} \delta_{y_j=l_2} \theta_{l_1 l_2} \mathbf{f}_{x_i x_j} \quad (2)$$

siendo $\mathcal{U}(\cdot)$ un factor local definido sobre el nodo asociado a y_i , y $\mathcal{I}(\cdot)$ un factor por pares sobre

el arco que conecta y_i y y_j . En estas ecuaciones δ es la función delta de Kronecker que toma el valor 1 si $y_i = l$, y 0 si $y_i \neq l$, θ es un vector de pesos o parámetros aprendido durante la fase de entrenamiento del CRF, y \mathbf{f}_{x_i} y $\mathbf{f}_{x_i x_j}$ son vectores de características extraídas de los objetos (color, tamaño, forma, etc.) y de sus relaciones de contexto (distancia, diferencia en altura, ratio de tamaño, etc.) respectivamente.

Una vez definidas las piezas que componen un CRF, y de acuerdo con el teorema de Hammersley-Clifford, la función de probabilidad $P(\mathbf{y}|\mathbf{x})$ puede ser finalmente factorizada sobre el grafo \mathcal{G} empleando modelos log-lineales como:

$$P(\mathbf{y}|\mathbf{x}, \theta) = \frac{1}{Z(\mathbf{x}, \theta)} \prod_{i \in \mathcal{V}} \exp(\mathcal{U}(y_i, x_i, \theta)) \prod_{(i,j) \in \mathcal{E}} \exp(\mathcal{I}(y_i, y_j, x_i, x_j, \theta)) \quad (3)$$

La esencia de esta representación es que, al elevar al exponente los factores, el resultado es siempre un valor mayor que 0, requisito básico para que el problema pueda modelarse mediante un CRF. Por su parte, $Z(\cdot)$ (también llamada función de partición) normaliza los factores para que el resultado sea una distribución de probabilidad, esto es $\sum_{\xi(\mathbf{y})} P(\mathbf{y}|\mathbf{x}, \theta) = 1$, siendo $\xi(\mathbf{y})$ una asignación posible a las variables en \mathbf{y} .

Para conseguir los resultados de reconocimiento hay que realizar un proceso de inferencia sobre el grafo \mathcal{G} , el cual nos permite obtener la asignación más probable $\hat{\mathbf{y}}$ a las variables en \mathbf{y} , esto es:

$$\hat{\mathbf{y}} = \arg \max_{\mathbf{y}} P(\mathbf{y}|\mathbf{x}, \theta) \quad (4)$$

Esta inferencia suele realizarse mediante métodos aproximados, ya que su cómputo requiere del cal-

culo de la función de partición $Z(\cdot)$, que suele resultar impracticable en problemas reales. En el estudio realizado en este trabajo se ha empleado el método *Loopy Belief Propagation* (LBP), dado su buen rendimiento [17].

4 MODELADO DEL CONTEXTO GEOMÉTRICO

Como se ha comentado, el modelado de la información contextual se basa en decidir qué objetos del entorno están relacionados entre sí, esto es, que nodos se conectan mediante un arco. Para tomar esta decisión se suele emplear un rango de contexto (distancia máxima a la que se considera que dos objetos están relacionados), cuya elección está estrechamente ligada al tipo de la información a modelar. Los trabajos más notorios en la literatura suelen usar observaciones de la escena proveyendo información de intensidad (imagen RGB) o de intensidad y profundidad (imágenes RGB-D).

En el caso de imágenes de intensidad, el rango de contexto puede establecerse en el plano de la imagen a nivel de pixel o super-pixel. Así, los pixels o super-pixels que guardan relación contextual son los que aparecen colindantes en la imagen. Con este enfoque no se respeta la geometría de la escena, por lo que, por ejemplo, una región correspondiente con un objeto cercano a la cámara podría conectarse con otro lejano. También hay trabajos que realizan una reconstrucción tridimensional de la escena, bien buscando puntos de fuga, con imágenes estéreo, etc., la cual permite medir distancias geométricas entre los objetos para establecer su contexto.

Por su parte, las imágenes RGB-D ya proporcionan dicha información tridimensional, por lo que son aptas para realizar medidas geométricas. Este es el tipo de imágenes utilizadas en este trabajo, discutiéndose a continuación las distintas maneras de realizar mediciones en las mismas.

4.1 MEDICIÓN DE LA DISTANCIA ENTRE OBJETOS

Una vez contamos con una imagen RGB-D de una escena, y considerando una representación en forma de nube de puntos $\mathbf{pc} = [p_1, \dots, p_m]$ donde $p_i = [x, y, z, r, g, b]$ (información geométrica y de color), el primer paso para establecer las relaciones de contexto es segmentar los objetos $\mathbf{o} = [o_1, \dots, o_n]$ que aparecen en la misma. Una vez segmentados, cada objeto se corresponderá con una región de la nube $o_i = \mathbf{pc}_i$, $\mathbf{pc}_i \subseteq \mathbf{pc}$. A continuación se discuten las opciones más relevantes para calcular las distancias entre regiones.

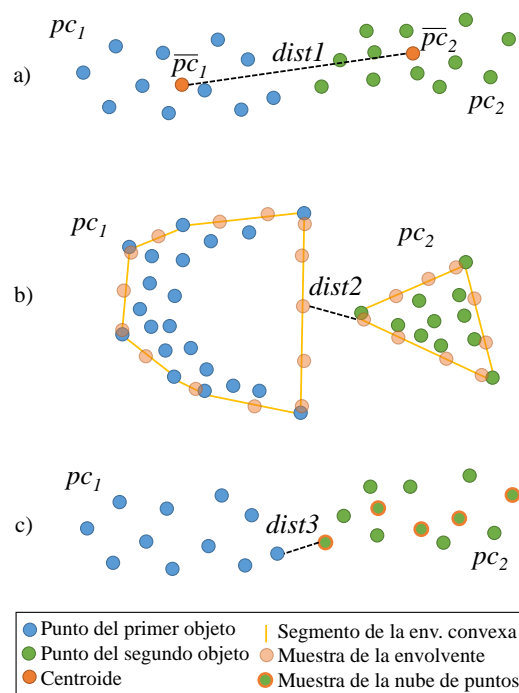


Figura 3: Ejemplos de nubes de puntos pertenecientes a dos objetos en 2 dimensiones, y 3 maneras de calcular la distancia entre ellos.

Entre los más populares, el primer enfoque para calcular la distancia entre \mathbf{pc}_i y \mathbf{pc}_j consiste en calcular sus centroides $\bar{\mathbf{pc}}_i$ y $\bar{\mathbf{pc}}_j$ y obtener la distancia euclídea entre ambos, esto es:

$$\text{dist1}(\mathbf{pc}_i, \mathbf{pc}_j) = \sqrt{\sum_{e=1}^3 (\bar{\mathbf{pc}}_{ie} - \bar{\mathbf{pc}}_{je})^2} \quad (5)$$

Aunque el cálculo de esta distancia es rápido, y el cómputo de los centroides puede aprovecharse para describir los objetos, tiene el problema de que pares de objetos grandes y próximos pueden presentar una distancia superior al rango de contexto y no ser conectados en el CRF (ver Fig. 3-a).

Una segunda opción es el cómputo de las envolventes convexas $C(\mathbf{pc}_i)$ y $C(\mathbf{pc}_j)$ que encierran a todos los puntos de cada objeto. Tomando muestras de dicha envoltente se pueden obtener una serie de puntos \mathbf{c}_i y \mathbf{c}_j sobre las que realizar mediciones de distancia euclídea, siendo la distancia entre dos objetos la menor de estas mediciones, es decir:

$$\text{dist2}(\mathbf{pc}_i, \mathbf{pc}_j) = \min_{(p_i \in \mathbf{c}_i, p_j \in \mathbf{c}_j)} \sqrt{\sum_{e=1}^3 (p_{ie} - p_{je})^2} \quad (6)$$

El usar esta distancia tiene el inconveniente de que un objeto con partes cóncavas podría generar mediciones de distancia irreales, dando lugar a relaciones de contexto erróneas (ver Fig. 3-b).

Por último, un tercer enfoque consiste en usar la fuerza bruta para computar la distancia mínima entre cada par de puntos de dos objetos, lo cual soluciona los problemas presentados por las opciones anteriores. No obstante, este proceso es altamente ineficiente y haría impracticable el reconocimiento. Una alternativa viable es la de construir una representación de la nube de puntos que permita realizar búsquedas de puntos cercanos de manera eficiente, como es el caso de los árboles kd [18]. Este es el enfoque usado en este trabajo, concretamente, se construye el árbol kd de \mathbf{pc}_i , $\text{kdtree}_{\mathbf{pc}_i}$ (complejidad $O(n \log n)$, siendo n el número de puntos), y se muestrea \mathbf{pc}_j para obtener una serie de puntos \mathbf{m}_j . De manera eficiente (complejidad $O(\log n)$) se busca el punto más cercano en el árbol a cada punto de \mathbf{m}_j , siendo la distancia entre los objetos el par más cercano (ver Fig. 3-c). Esto es:

$$\text{dist3}(\mathbf{pc}_i, \mathbf{pc}_j) = \min_{(p_i \in \mathbf{pc}_i, p_j \in \mathbf{m}_j)} \text{dist}(\text{kdtree}_{\mathbf{pc}_i}, p_j) \quad (7)$$

Como se ha comentado, una vez calculada la distancia entre dos objetos, se usa el rango de contexto fijado (*p.e.* un metro, dos, etc.) para decidir si existe o no una relación de contexto geométrico entre ambos. La elección del rango de contexto es clave para poder sacar el máximo partido a estas relaciones, y es estudiado en profundidad en la Sec. 5. Con un rango corto se establecerían pocas relaciones y podría descartarse información contextual valiosa, pero los procesos de entrenamiento e inferencia sobre CRFs serían rápidos. Por otro lado, un rango grande consideraría una mayor porción de dicha información, pero podría perjudicar a los tiempos de entrenamiento e inferencia y aumentar su complejidad. El rango de contexto se ve influenciado por un factor adicional: la extensión de la información contextual contenida en la imagen, tal y como se comenta en la siguiente sección.

4.2 EXTENSIÓN DE LA INFORMACIÓN CONTEXTUAL

Tanto cuando se usan imágenes de intensidad como RGB-D, para sacarle el máximo partido a la información contextual es necesario que en la observación aparezca la mayor porción de la escena posible. De no ser así, esta información puede resultar escasa e incompleta en algunos casos, siendo de poca utilidad. Por ejemplo, en la Fig. 4 se muestran a la izquierda dos observaciones con información contextual limitada, mientras que en las de la derecha la extensión de esta es mucho mayor.

Una manera de extender la información contextual a modelar es considerar una porción de la



Figura 4: A la izquierda, nubes de puntos de una cocina y un cuarto de baño con información contextual limitada. A la derecha, nubes de las mismas habitaciones donde la información contextual más extensa.

escena mayor que la proporcionada por una simple imagen. Para ello se hace necesario propagar en el tiempo y el espacio la información en cada observación mediante algún algoritmo de registro o reconstrucción. A pesar de lo interesante de su uso desde el punto de vista del aprovechamiento del contexto, el reconstruir una escena puede acarrear una serie de problemas adicionales fuente de errores en el sistema reconstructor. Por ejemplo, un mal registro de dos imágenes puede hacer que los objetos aparezcan dobles o deformes. Además, en aplicaciones donde se requiera que el reconocimiento de objetos funcione a una cierta frecuencia, el algoritmo de reconstrucción ha de ser suficientemente rápido para soportar dicha frecuencia. Aunque el análisis de distintos métodos de reconstrucción está fuera del alcance de este artículo, si es relevante el efecto de contar con distintas extensiones de la información contextual en el reconstructor, factor que se analiza en la siguiente sección.

5 ESTUDIO Y RESULTADOS

En este apartado se introducen las herramientas y equipos empleados (Sec. 5.1) en el análisis del rango de contexto (Sec. 5.2) y la extensión de la información contextual (Sec. 5.3), así como los resultados que se desprenden del estudio realizado.

5.1 HERRAMIENTAS EMPLEADAS

Para el modelado, entrenamiento e inferencia de los CRFs en este trabajo se ha empleado la librería *Undirected Probabilistic Graphical Models in C++*

Tabla 1: Influencia de la utilización de distintos rangos de contexto sobre el número de relaciones contextuales establecidas, los tiempos necesarios para el entrenamiento y la inferencia de los CRFs usados, y el éxito en el reconocimiento de estos.

Rango	# de relaciones	Tpo. entrenamiento	Tpo. inferencia	Éxito
0m	0 (0%)	2.02s	0.01ms	64.92%
0.5m	631 (14%)	17.48s	0.15ms	70.54%
1m	1,379 (31%)	29.10s	0.36ms	71.17%
1.5m	2,107 (48%)	35.76s	0.69ms	72.39%
2m	2,917 (66%)	37.14s	1.04ms	73.51%
3m	3,805 (86%)	32.50s	1.81ms	70.29%
4m	4,248 (96%)	27.40s	2.37ms	69.26%
5m	4,387 (99%)	19.57s	2.84ms	68.18%
6m	4,410 (100%)	18.09s	3.23ms	67.86%

(UPGMpp) [19], un software libre especialmente desarrollado para facilitar la utilización de estos modelos en el reconocimiento de objetos.

Por otra parte, para el análisis de las distintas opciones de modelado contextual se ha contado con el conjunto de datos *Robot@Home* [7]. Este repositorio contiene más de 69,000 imágenes RGB-D capturadas por medio de un robot móvil en entornos domésticos reales, donde aparecen 157 categorías de objetos etiquetadas. De entre ellas, en este trabajo se han seleccionado para ser reconocidas las 19 más comunes, sumando un total de ~600 instancias de objetos.

Para evaluar el éxito en el reconocimiento se ha empleado validación cruzada. En cada paso de este método se emplean las observaciones provenientes de una habitación elegida al azar para evaluar, y las 31 restantes para entrenar. Esto se repite 1,000 veces cambiando la habitación con la que evaluar, y los resultados son promediados.

Las pruebas se realizaron en un ordenador con un microprocesador Intel Core i7-3820 a 3.60GHz. y una memoria RAM de 4x4GB. DDR3 a 1,600MHz.

5.2 INFLUENCIA DEL RANGO DE CONTEXTO

Con el fin de medir la influencia del rango de contexto en el rendimiento del sistema de reconocimiento, se han usado las reconstrucciones de las 32 habitaciones comentadas (la Fig. 4 muestra a la derecha dos de ellas). Estas reconstrucciones tienen la forma de nubes de puntos con información geométrica y de apariencia (intensidad). La Tab. 1 muestra los resultados del estudio llevado a cabo, donde la primera fila se corresponde con un CRF que no emplea información contextual, mientras que el resto reportan el rendimiento de CRFs que usan esta información con distintos rangos de contexto. Se puede apreciar como el

éxito en el reconocimiento siempre es mayor en las configuraciones que explotan relaciones sin importar el rango elegido.

En cuanto al número de relaciones consideradas por cada opción, empleando un rango de contexto de 0.5 metros se explotan el 14% de ellas (4,410 existentes), mientras que hay que irse hasta una distancia de 6 metros para que se incluyan todas. Desde los 0 hasta los 2 metros, el incremento del rango de contexto acarrea un aumento en el éxito del reconocedor, alcanzándose con el último un ~ 73.5% (un ~ 8.5% más que sin emplear contexto). Esto se debe a que, conforme aumenta el rango, entran en consideración relaciones que tienden a cumplirse aunque no siempre presenten distancias cortas. Por ejemplo, en una cocina pueden aparecer un grifo y una placa de inducción típicamente a una distancia superior a medio metro. No obstante, hay un punto a partir del cual el incremento de este rango tiene un efecto negativo en el éxito, dada la alta variabilidad de las relaciones y la aparición de otras que rara vez se cumplen. En el trabajo de Anand *et al.* [16] este punto se sitúa en 0.6 metros en entornos domésticos. Esta considerable diferencia se debe probablemente a la extensión de la información contextual usada, como veremos en el siguiente apartado.

El incremento del rango de contexto también conlleva un mayor tiempo de ejecución del algoritmo de inferencia, que va desde los 0.15ms. con medio metro, hasta los 3.23ms. con 6 metros, situándose en 1.04ms. para el rango con el que se alcanza el mayor éxito. Esto pone de manifiesto que una elección arbitraria del rango puede resultar en un rendimiento no óptimo del reconocedor.

Un hecho curioso a primera vista es la evolución del tiempo de entrenamiento. Al ser un proceso iterativo (*Stochastic Gradient Descent*, más información en [17]), el añadir más carga computa-

Tabla 2: Influencia que tiene la utilización de distintos rangos de contexto sobre el número de relaciones contextuales establecidas, los tiempos necesarios para el entrenamiento y la inferencia de CRFs, y el éxito en el reconocimiento.

Rango	# relaciones	Éxito
0.5m	235	70.63%
1m	446	70.21%
1.5m	650	69.71%
2m	757	69.69%
3m	854	69.49%
4m	872	69.44%
5m	908	69.32%
6m	918	69.07%

cional por iteración al considerar más relaciones contextuales hace más costosa la fase de entrenamiento. Así ocurre hasta los 2 metros, pero a partir de ahí el tiempo necesario para entrenar baja. Esto se debe a la aparición de relaciones espurias, que impiden al proceso converger a modelos más exactos, resultando en un tiempo de ejecución menor. En cualquier caso, los tiempos de entrenamiento son comedidos para un proceso que solo ha de ejecutarse una vez.

5.3 REPERCUSIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA INFORMACIÓN CONTEXTUAL

Para analizar como afectan distintas extensiones de la información contextual al éxito del reconocimiento se han entrenado y evaluado CRFs con imágenes RGB-D individuales de las 32 habitaciones (la Fig. 4 muestra a la izquierda dos nubes de puntos formadas a partir de estas imágenes). Estos CRFs se pueden comprar con los de la sección anterior, donde la extensión de esta información era más amplia. Para que la comparativa fuera lo más justa posible, de nuevo se ha empleado un método de validación cruzada, pero en esta ocasión una imagen de una habitación es escogida para evaluar, mientras que 31 imágenes del resto de habitaciones se usan para entrenar (estas selecciones se hacen todas al azar). El proceso se repite mil veces, y se promedian los resultados.

La Tab. 2 muestra los resultados obtenidos. Como se puede ver, el mayor éxito se alcanza para un rango de contexto de medio metro ($\sim 70.5\%$), rango similar al óptimo alcanzado en [16], lo que hace pensar que la extensión de la información usada por Anand *et al.* era limitada. A partir de esa distancia, el éxito decrece paulatinamente hasta el $\sim 69\%$ obtenido con un rango de 6 metros. Esto se debe a que al considerar mayores rangos mante-

niendo una extensión de la información contextual baja, aparecen relaciones en las imágenes que no se repiten a lo largo del conjunto de datos de entrenamiento, dificultando el ajuste de los CRFs. Así, la mejor configuración empleando imágenes individuales alcanza un éxito 3 puntos porcentuales menor que empleando una extensión más amplia ($\sim 70.5\%$ vs. $\sim 73.5\%$).

En lo referente al número de relaciones con las que se trabaja, este también es menor, tal y como muestra la segunda columna de la tabla. Por ejemplo, con un rango de 6 metros se incluyen 918, por las 4,410 de la sección anterior. Por otro lado, el tiempo de ejecución del algoritmo de inferencia se mantiene estable y por debajo de los 0.3ms., mientras que el de entrenamiento va desde los 8s. con un rango de 0.5m. hasta los 17s. con 3m., distancia a partir de la cual se mantiene constante.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado como influyen distintas opciones de modelado del contexto geométrico en el rendimiento de sistemas basados en Campos Aleatorios Condicionales (del inglés *Conditional Random Fields*, CRFs) para el reconocimiento de objetos por parte de un robot móvil. En concreto, se ha analizado como afecta la utilización de distintos rangos de contexto, esto es, distancias máximas a las que se considera que dos objetos están relacionados, y de distintas extensiones de la información contextual: información proveniente de una imagen individual de la escena, o de una reconstrucción de la misma.

En casos donde la información contextual es extensa (*p.e.* empleando reconstrucciones de la escena), el análisis realizado con el conjunto de datos *Robot@Home* reporta el beneficio de emplear un rango de información contextual de 2 metros, consiguiendo un éxito del $\sim 73.5\%$, un tiempo de inferencia de 1.04ms, y un tiempo de entrenamiento de 37.14s. Para rangos menores, aunque los tiempos de entrenamiento e inferencia decrecen, también lo hace el éxito alcanzado. En cambio, para rangos mayores, el tiempo de inferencia aumenta a la vez que desciende el éxito reportado. Este es un efecto poco deseable que pone de manifiesto la necesidad del estudio completado para fijar un rango óptimo.

Por otra parte, cuando la extensión de la información contextual no es extensa (*p.e.* trabajando con imágenes individuales), en el caso del conjunto de datos empleado los mejores resultados se consiguen con un rango de 0.5 metros. En lo referente al éxito alcanzado, este es un 3% menor que empleando información contextual extensa,

aunque con tiempos de entrenamiento e inferencia también más bajos. Esto muestra la estrecha relación que existe entre el rango de contexto y la extensión de esta información, siendo necesario en cada aplicación particular adaptar el primero conforme a la amplitud del segundo.

En un futuro se plantea el estudio de como podría influir en el reconocimiento la utilización de rangos de contexto dinámicos, que se ajustaran automáticamente dependiendo de la información disponible sobre la escena.

Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado en el marco de los proyectos TEP2012-530 y DPI2014-55826-R, financiados por la Junta de Andalucía y el Ministerio de Ciencia e Innovación respectivamente, ambos contando con fondos del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

Referencias

- [1] P. Viola and M. Jones. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. In *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2001)*, volume 1, pages 511–518, 2001.
- [2] Jianguo Zhang, M. Marszalek, S. Lazebnik, and C. Schmid. Local features and kernels for classification of texture and object categories: A comprehensive study. In *2006 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop (CVPRW'06)*, pages 13–13, June 2006.
- [3] D. Nister and H. Stewenius. Scalable recognition with a vocabulary tree. In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, volume 2, pages 2161–2168, 2006.
- [4] M. Oliveira, L. Seabra Lopes, G. H. Lim, S. H. Kasaei, A. D. Sappa, and A. M. Tomé. Concurrent learning of visual codebooks and object categories in open-ended domains. In *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 2488–2495, Sept 2015.
- [5] Carolina Galleguillos and Serge Belongie. Context based object categorization: A critical survey. *Computer Vision and Image Understanding*, 114(6):712–722, June 2010.
- [6] D. Koller and N. Friedman. *Probabilistic Graphical Models: Principles and Techniques*. MIT Press, 2009.
- [7] J. R. Ruiz-Sarmiento, C. Galindo, and J. González-Jiménez. Robot@home, a robotic dataset for semantic mapping of home environments. *The International Journal of Robotics Research*, 36(2):131–141, 2017.
- [8] David G. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2):91–110, November 2004.
- [9] Jan Knopp, Mukta Prasad, Geert Willems, Radu Timofte, and Luc Van Gool. Hough transform and 3d surf for robust three dimensional classification. In *Proceedings of the 11th European Conference on Computer Vision: Part VI, ECCV'10*, pages 589–602, Berlin, Heidelberg, 2010. Springer-Verlag.
- [10] M. Pontil and A. Verri. Support vector machines for 3d object recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(6):637–646, Jun 1998.
- [11] Xuehan Xiong and Daniel Huber. Using context to create semantic 3d models of indoor environments. In *In Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC 2010)*, pages 45.1–11, 2010.
- [12] J. G. Rogers and H. I. Christensen. A conditional random field model for place and object classification. In *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on*, pages 1766–1772, May 2012.
- [13] Dahua Lin, Sanja Fidler, and Raquel Urtasun. Holistic scene understanding for 3d object detection with rgbd cameras. *IEEE International Conference on Computer Vision*, 0:1417–1424, 2013.
- [14] J. R. Ruiz-Sarmiento, C. Galindo, and J. González-Jiménez. Building multiversal semantic maps for mobile robot operation. *Knowledge-Based Systems*, 119:257 – 272, 2017.
- [15] J. R. Ruiz-Sarmiento, M. Günther, C. Galindo, J. González-Jiménez, and J. Hertzberg. Online context-based object recognition for mobile robots. In *17th International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*. IEEE, April 2017.
- [16] Abhishek Anand, Hema Swetha Koppula, Thorsten Joachims, and Ashutosh Saxena. Contextually guided semantic labeling and search for three-dimensional point clouds. In *The International Journal of Robotics Research*, 32(1):19–34, January 2013.
- [17] J. R. Ruiz-Sarmiento, C. Galindo, and J. González-Jiménez. A survey on learning approaches for probabilistic graphical models. application to scene object recognition. *International Journal of Approximate Reasoning*, 83(C):434–451, April 2017.
- [18] Jerome H. Friedman, Jon Louis Bentley, and Raphael Ari Finkel. An algorithm for finding best matches in logarithmic expected time. *ACM Trans. Math. Softw.*, 3(3):209–226, September 1977.
- [19] J.R. Ruiz-Sarmiento, C. Galindo, and J. González-Jiménez. UPGMpp: a Software Library for Contextual Object Recognition. In *3rd. Workshop on Recognition and Action for Scene Understanding*, 2015.

Estimación Probabilística de Áreas de Emisión de Gases con un Robot Móvil Mediante la Integración Temporal de Observaciones de Gas y Viento

Carlos Sanchez-Garrido, Javier Monroy, Javier Gonzalez-Jimenez

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Instituto de Investigación Biomédica de Málaga, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos, 29071, Málaga.
carlossanchez@uma.es, jgmonroy@uma.es, javiergonzalez@uma.es

Resumen

En este trabajo se aborda el uso de un robot móvil para determinar la posición de una fuente de gas. Específicamente, nos centramos en el caso de entornos complejos, donde la presencia de múltiples habitaciones y obstáculos favorecen una dispersión caótica de los gases, lo cual dificulta en gran medida un modelado matemático del problema. Bajo estas condiciones, proponemos dividir la tarea de localización en dos fases: primero, determinar la zona del entorno donde se encuentra la fuente, y luego, determinar con precisión la localización de la misma dentro de la zona seleccionada. Centrándonos en la primera fase, proponemos el uso de un novedoso enfoque basado en un marco Bayesiano-probabilístico. Nuestro planteamiento se basa en la generación previa de un conjunto de mapas de dispersión de gas (empleando herramientas de simulación), atendiendo a las diferentes zonas del entorno y condiciones de viento. Comparando estos mapas con la información sensorial adquirida por el robot en cada instante de tiempo, derivamos la probabilidad de localización de la fuente, y guiamos el movimiento del robot hacia la dirección de máxima probabilidad. Para validar nuestro enfoque presentamos un total de 36 experimentos en los que un robot móvil localiza una fuente de gas en un entorno compuesto por múltiples habitaciones conexas.

Palabras clave: localización de fuentes de gas, robots olfativos, entornos complejos, obstáculos.

1. Introducción

Una fuente de gas es cualquier elemento del entorno con la propiedad de generar o liberar sustancias volátiles (gases). Esta definición abarca a una gran cantidad de objetos: recipientes abiertos, fugas en tuberías, explosivos, materia orgánica en descomposición, etc. Los gases emanados por estas fuentes se dispersan en el entorno por efecto de diferentes principios físicos, principalmente difusión y advección [2], que a su vez dependen de muchos factores ambientales: dirección y velocidad del viento, temperatura, humedad, etc. Este

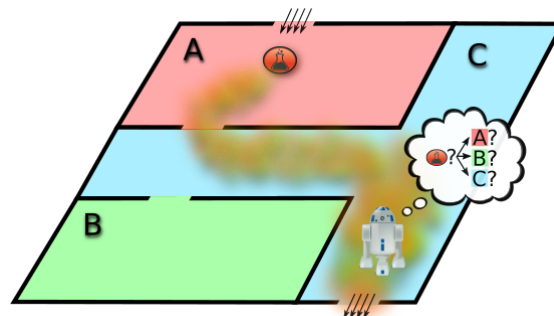


Figura 1: Búsqueda por zonas de la fuente de gas.

hecho dificulta en gran medida su correcta localización, puesto que los gases detectados a grandes distancias de su origen han podido seguir trayectos muy dispares, especialmente en entornos complejos donde la presencia de obstáculos (paredes, mobiliario, etc.) provocan turbulencias que modifican en gran medida los patrones de dispersión [23].

La búsqueda y localización de una fuente de gas consiste, por tanto, en estimar, a partir de una serie de medidas sensoriales, la posición de ésta dentro del entorno. Muchas son las aplicaciones que se beneficiarían de un sistema capaz de localizar fuentes emisoras de sustancias volátiles, entre ellas: encontrar supervivientes en zonas catastróficas, detener un incendio o fuga en las etapas iniciales detectar explosivos, drogas o agentes peligrosos, o la monitorización de vertederos y almacenes químicos. Tradicionalmente, la localización de fuentes gaseosas se ha abordado desde dos perspectivas diferentes: el despliegue de redes sensoriales [24] y el uso de vehículos autónomos con capacidad olfativa [1]. La primera se basa en distribuir por el entorno una red de sensores capaces de monitorizar la composición química del aire. Este enfoque presenta las desventajas de no ser escalable al aumentar las dimensiones del entorno, así como de implicar un elevado coste de instalación y mantenimiento. La segunda opción, por la que nos decantamos en este trabajo, consiste en emplear un robot móvil, dotado con la capacidad de medir la composición química del aire mediante el uso de un conjunto de sensores de gas comúnmente deno-

minado "nariz electrónica" [22] y de un anemómetro para medir la velocidad y dirección del viento. La ventaja de emplear un robot móvil es que se puede monitorizar los gases del entorno de forma adaptativa y con un menor coste, lo cual, añadido a la posibilidad de fusionar esta información con la proveniente de otros sistemas sensoriales del robot (láseres, cámaras, etc.), lo convierten en un enfoque muy interesante y prometedor.

No obstante, la búsqueda y localización de fuentes de gas con robots móviles no es una tarea sencilla, especialmente en entornos complejos donde la presencia de obstáculos contribuye a una dispersión caótica de los gases. Esto se aprecia en el hecho de que la mayoría de los trabajos propuestos trabajan con condiciones muy simplificadas y lejos de la realidad [17], considerando viento laminar y/o homogéneo, entornos pequeños y libres de obstáculos, etc. Bajo estas condiciones, la dispersión del gas puede ser modelada matemáticamente [5], y diversos algoritmos han sido propuestos para explotar el gradiente de concentración generado [6]. Sin embargo, estas condiciones "simplificadas" no se cumplen en la mayoría de los entornos reales, lo cual limita en gran medida su aplicación práctica.

Nuestro interés reside en la búsqueda de fuentes emisoras de gas en entornos reales, con presencia de múltiples habitaciones y obstáculos, y donde un modelado matemático de la pluma no es aplicable por la gran complejidad inherente. Bajo estas condiciones, proponemos dividir el problema de localización en dos fases, siguiendo un diseño "top-down": primero, determinar la zona del entorno donde se encuentra la fuente (véase Figura 1), y luego, determinar con precisión la localización de la misma dentro de la zona seleccionada (siendo este un espacio más simple). En este trabajo consideramos zona de emisión como el espacio conectado que abarca todas las localizaciones del entorno desde las cuales una fuente de gas genera mapas de concentración muy similares. Esto ocurre, típicamente, en habitaciones, aunque cabe mencionar que cuando estas contienen obstáculos significativos, diversas zonas de emisión pueden ser definidas.

En este trabajo nos centramos en la primera fase de la búsqueda, proponiendo un novedoso enfoque basado en un marco Bayesiano-probabilístico. Nuestro planteamiento se basa en la generación previa de un conjunto de mapas de dispersión de gas (mediante herramientas de simulación) atendiendo a las diferentes zonas del entorno y condiciones de viento. Comparando estos mapas con la información sensorial adquirida por el robot (en este trabajo consideramos localización, concentración de gas y vector de viento), ponderamos proba-

bilísticamente los distintos escenarios simulados, y guiamos el movimiento del robot hacia la dirección de máxima probabilidad. Este algoritmo, además de contribuir ampliando la búsqueda de fuentes de gas a entornos complejos, combina cualquier tipo de información que exista en el entorno sobre la localización de la fuente, no sólo la obtenida a través del gas y el viento como se muestra en este trabajo, sino también otras menos utilizadas como podrían ser la visión, o la información semántica [20]. Finalmente, en este trabajo nos centramos en robots móviles que se mueven en entornos planos, lo cual permite simplificar el problema a una búsqueda en dos dimensiones.

Tras un resumen de los trabajos relacionados en la sección 2, se presenta una descripción del problema, sección 3, y la generación de los mapas de dispersión por simulación en la sección 4. El apartado 5 describe el método de localización de la fuente de gas. A continuación la sección 6 describe los experimentos y los resultados obtenidos. Concluimos con un resumen y los trabajos futuros (sección 7).

2. Trabajos Relacionados

El interés por la localización de fuentes de gas mediante el uso de robots dotados de capacidad olfativa no es algo novedoso y diversas estrategias han sido propuestas a lo largo de las últimas dos décadas. Los primeros trabajos, basados en el concepto de *quimiotaxis* o reacción de orientación como respuesta a un estímulo químico, fueron propuestos por Rozas en [19] empleando un solo robot móvil, y por Genovese [7] y Buscemi [4] para el caso de múltiples robots. Las estrategias propuestas eran en su mayoría basadas en comportamientos reactivos y bio-inspirados en animales que utilizan el sentido del olfato para realizar diversas funciones vitales. Como ejemplo, Kuwana [12] y Pyk [18] se inspiraron en como las polillas buscan a sus parejas, Grasso [8] en como las langostas buscan alimento, o Russell [21] en como localizan nutrientes las bacterias *Escherichia coli*.

Posteriormente, explotando el hecho de que el viento es el principal responsable en la dispersión de los gases, diferentes propuestas fueron presentadas haciendo uso, no solo de medidas sobre la concentración de los gases a estudiar, más del flujo de aire (dirección y magnitud del viento). Estas estrategias reciben el nombre de *fluxotaxis* (orientación en respuesta al flujo de gas). Para implementar este tipo de búsqueda con robots se utiliza la información obtenida por un anemómetro (dirección y fuerza del viento) para rastrear la pluma en dirección contraria al viento hasta llegar a la fuente emisora, como en [10] o [13].

En la última década, algoritmos de tipo cognitivo han ganado importancia en la comunidad científica. Por ejemplo, para minimizar la entropía de la información que se tiene sobre la posición de la fuente, [25], acuña el término *infotaxis* para un algoritmo que propone moverse en dirección a los lugares donde obtener mayor información sobre la localización de la fuente y no directamente a esta. Otro tipo de algoritmos utilizados son los basados en maximizar la esperanza. Estos buscan estimadores de máxima verosimilitud para determinar los parámetros de un modelo probabilístico basado en variables no observables [26].

No obstante, la mayoría de estos trabajos han sido diseñados y validados para trabajar en entornos muy simples (generalmente una habitación libre de obstáculos con viento laminar), lo cual limita su aplicabilidad a entornos reales. Una excepción son los algoritmos basados en el modelado probabilístico de la distribución del gas [15] [3], los cuales determinan la localización de la fuente tras generar un mapa de la dispersión del gas en el entorno sin asumir ningún modelo. La principal limitación de estos algoritmos es su baja eficiencia temporal, necesitando muchas observaciones distribuidas a lo largo del entorno para poder estimar correctamente la localización de la fuente.

Para una revisión más detallada de las diferentes estrategias de búsqueda de fuentes de gas, el lector puede dirigirse a trabajos como [11], [9] o [1].

3. Definición del Problema

El problema abordado en este trabajo es determinar la localización de una fuente de gas dentro de un entorno caracterizado por la presencia de múltiples habitaciones y obstáculos con la ayuda de un robot móvil dotado de capacidad olfativa. Para ello suponemos que la dispersión del gas se encuentra en un régimen permanente, esto es, que la fuente de gas lleve activa el suficiente periodo de tiempo como para asegurar que la dispersión del gas en el entorno ha alcanzado un estado estacionario. Además asumimos que dicho entorno se divide en N_r posibles zonas de emisión, $\mathbf{r} = \{r_i\}_{i=1}^{N_r}$, típicamente habitaciones, siendo el objetivo determinar cual de éstas contiene la fuente de gas (véase Fig. 1).

Dado que la dispersión de un gas está fuertemente relacionada con las condiciones de viento, definiremos igualmente un conjunto de mapas de viento $\mathbf{v} = \{\mathbf{v}_j\}_{j=1}^{N_v}$, siendo N_v el número de diferentes condiciones de viento a considerar en el entorno de trabajo, y $\mathbf{v}_j = \{\mathbf{w}_l\}_{l=1}^N$ una cuadrícula formada por N celdas, donde cada celda especifica las componentes del vector de viento en 2D $\mathbf{w} = (u, v)$.

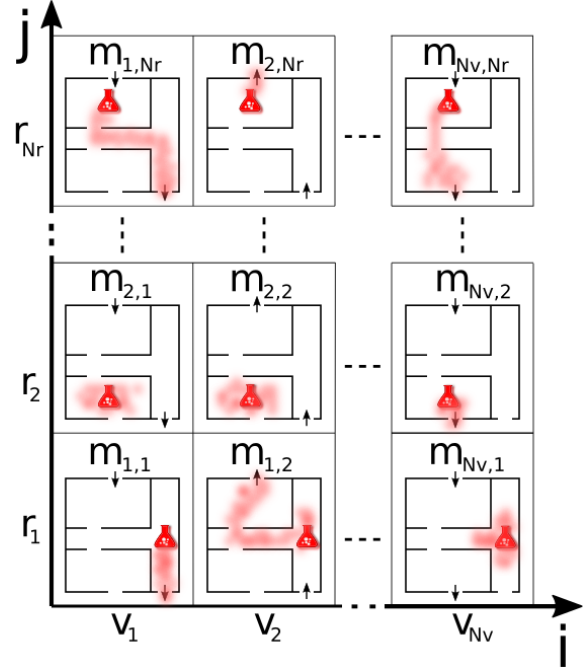


Figura 2: Mapas de distribución (\mathbf{m}) generados a partir de las zonas (\mathbf{r}) y de las condiciones de viento (\mathbf{v}) en el entorno.

Nuestro enfoque se basa en obtener un conjunto de mapas de dispersión simulados \mathbf{m} , generados atendiendo a las zonas del entorno y a las diferentes condiciones de viento que se puedan dar en el mismo (véase Fig. 2), quedando definido como: $\mathbf{m} = \{\mathbf{m}_{i,j}\}_{i=1:N_r}^{j=1:N_v}$. Cada mapa de dispersión $\mathbf{m}_{i,j}$ resulta de considerar la fuente de gas en la zona r_i bajo la influencia del flujo de viento \mathbf{v}_j . Como en el caso de los mapas de viento, cada $\mathbf{m}_{i,j} = \{c_{i,j}^l, \mathbf{w}_{i,j}^l\}_{l=1}^N$ se define como un mapa de cuadrícula en el que cada celda (l) contiene el valor de la concentración del gas (c) y del vector de viento (\mathbf{w}) simulados.

En cada instante de tiempo t_k , el robot toma una nueva observación $\mathbf{z}_k = \{c_k, \mathbf{w}_k\}$ en la celda l_k , compuesta por la concentración de gas y el vector de viento en la posición actual del robot. Asumimos que ambas medidas son independientes entre si y están corrompidas por ruido Gaussiano con media cero y varianza propia del sensor empleado, esto es: $\mathbf{z}_k = \mathcal{N}(\bar{\mathbf{z}}_k, \Sigma_z)$, donde $\bar{\mathbf{z}}_k = [\bar{c}_k, \bar{u}_k, \bar{v}_k]$ es el vector de valores medios de la observación, y la matriz de covarianza se define como:

$$\Sigma_z = \begin{bmatrix} \sigma_c & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_u & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_v \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Atendiendo a la relación existente entre las diversas observaciones tomadas a lo largo del tiempo, el objetivo es calcular la probabilidad de cada uno de

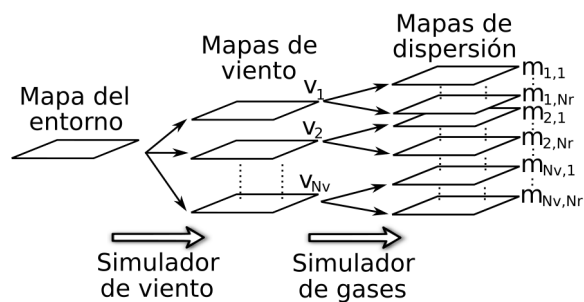


Figura 3: Fases del proceso de simulación del conjunto de mapas de dispersión \mathbf{m} . Inicialmente se simulan N_v mapas de viento, y luego, atendiendo a las N_r zonas definidas en el entorno, se simulan los mapas de dispersión \mathbf{m}_n .

los mapas de dispersión simulados atendiendo al histórico de observaciones, esto es $p(\mathbf{m}|\mathbf{z}_{1:k})$, cuyo cálculo se detalla en la Sección 5. Finalmente, tras evaluar dicha probabilidad en cada iteración, se estima la nueva dirección de movimiento del robot hacia la zona r_i correspondiente al mapa $\mathbf{m}_{i,j}$ de mayor probabilidad, o se da por terminada la búsqueda si se tiene suficiente certeza de su localización (declaración de fuente).

4. Generación de Mapas de Dispersión

Esta sección detalla el proceso de generación de los mapas de dispersión \mathbf{m} , los cuales son parte fundamental del algoritmo probabilístico propuesto en este trabajo. Dado que \mathbf{m} depende del número de zonas y condiciones de viento en el entorno, el número total de mapas a considerar puede ser elevado y consecuentemente su cálculo puede ser costoso. No obstante, cabe mencionar que este paso se realiza una única vez, previamente a la búsqueda de la fuente como tal (descrita en la Sección 5), por lo que el robot dispone de este conjunto de mapas desde un primer momento.

Para obtener estos mapas de dispersión proponemos usar diferentes herramientas de simulación, las cuales nos dan una aproximación sobre cómo se dispersa el gas atendiendo a los obstáculos existentes en el entorno, las condiciones de viento y la posición de la fuente (en nuestro caso la zona r_i que contiene la fuente). Como se observa en la Fig. 3, el proceso de obtención de los mapas de dispersión se realiza en dos etapas, utilizando un simulador distinto en cada caso. En un primer paso se obtienen los datos del flujo de viento para cada una de las N_v condiciones estudiadas, estimando en cada caso el mapa de viento \mathbf{v}_j mediante el enfoque propuesto en [16], el cual aproxima el vector de viento en cada celda del entorno aten-

diendo a las condiciones de contorno, la presencia de obstáculos y una serie de restricciones basadas en mecánica de fluidos. Posteriormente, estos mapas de viento son procesados por GADEN [14], un simulador de dispersión de gases que, junto a las diferentes zonas r_i del entorno, dan lugar a los $N_d = N_v \times N_r$ mapas de dispersión del gas. Cada mapa generado es por tanto función de la zona r_i donde se simula la fuente y del mapa de viento \mathbf{v}_j empleado durante la simulación.

5. Método

En este artículo proponemos un algoritmo de búsqueda que se compone de cinco fases o etapas (véase Fig. 4): toma de observaciones, pesado probabilístico, filtrado Bayesiano, evaluación y movimiento del robot. Los siguientes apartados describen en detalle cada una de estas fases.

5.1. Pesado Probabilístico

Para cada nueva observación \mathbf{z}_k tomada en la celda l_k , buscamos estimar la probabilidad de cada uno de los mapas de dispersión $p(\mathbf{m}_{i,j}|\mathbf{z}_k)$. Para ello calculamos la distancia existente entre la observación tomada (entendida como una variable aleatoria con distribución Normal) y el valor correspondiente en esa misma celda en el mapa de dispersión, $\mathbf{m}_{i,j}^{l_k} = [c_{i,j}^{l_k}, u_{i,j}^{l_k}, v_{i,j}^{l_k}]$, modelado en este caso como un vector escalar, sin incertidumbre asociada¹. Esto corresponde a calcular la distancia de Mahalanobis, donde dada la naturaleza diagonal de la matriz de covarianza (véase Eq. (1)), se denomina igualmente distancia Euclídea normalizada:

$$DM(\mathbf{m}_{i,j}^{l_k}, \mathbf{z}_k) = \sqrt{(\bar{\mathbf{z}}_k - \mathbf{m}_{i,j}^{l_k})^T \Sigma_z^{-1} (\bar{\mathbf{z}}_k - \mathbf{m}_{i,j}^{l_k})} \quad (2)$$

Finalmente, la probabilidad de cada mapa de dispersión viene dada por:

$$p(\mathbf{m}_{i,j}|\mathbf{z}_k) = \frac{1}{\sqrt{|2\pi\Sigma_z|}} \exp\left(\frac{-DM(\mathbf{m}_{i,j}^{l_k}, \mathbf{z}_k)^2}{2}\right) \quad (3)$$

5.2. Filtrado Bayesiano

En la Sección anterior hemos derivado la probabilidad a posteriori de cada uno de los mapas de dispersión de gas a partir de una observación puntual \mathbf{z}_k . En esta sección buscamos dar robustez al sistema, integrando la información de todas las observaciones hasta el instante de tiempo actual.

¹Considerar una incertidumbre asociada a los datos simulados de los mapas de dispersión se deja para trabajo futuro.

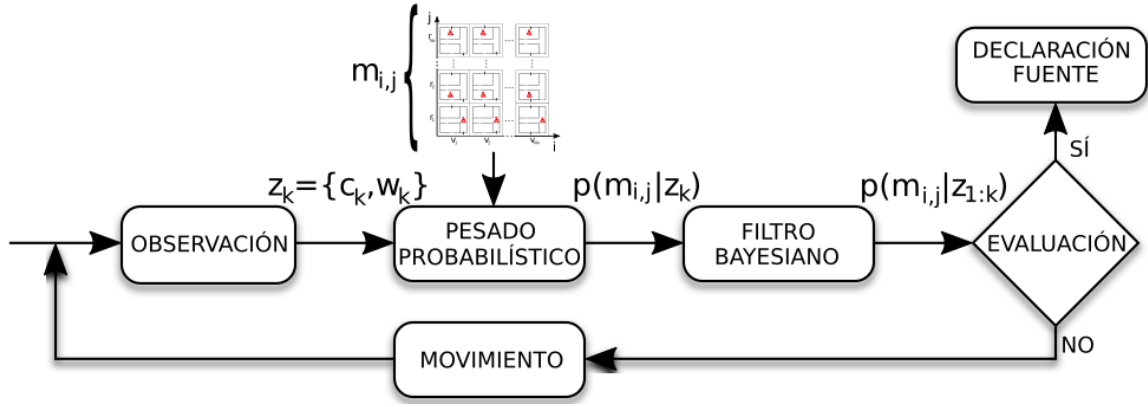


Figura 4: Diagrama del método para la localización de la zona en la que se encuentra la fuente de gas.

Para ello hacemos uso de la versión recursiva del filtro de Bayes, el cual define el belief en el instante de tiempo actual $Bel_k(\mathbf{m}_{i,j}) = p(\mathbf{m}_{i,j}|\mathbf{z}_{1:k})$ en función del belief en el instante de tiempo anterior $Bel_{k-1}(\mathbf{m}_{i,j})$ y la observación más reciente \mathbf{z}_k .

Para derivar la formulación específica a nuestro problema, comenzamos aplicando el teorema de Bayes al belief objetivo:

$$\begin{aligned} Bel_k(\mathbf{m}_{i,j}) &= \frac{p(\mathbf{z}_k|\mathbf{m}_{i,j}, \mathbf{z}_{1:k-1}) p(\mathbf{m}_{i,j}|\mathbf{z}_{1:k-1})}{p(\mathbf{z}_k|\mathbf{z}_{1:k-1})} \\ &= \frac{p(\mathbf{z}_k|\mathbf{m}_{i,j}) p(\mathbf{m}_{i,j}|\mathbf{z}_{1:k-1})}{p(\mathbf{z}_k|\mathbf{z}_{1:k-1})}, \end{aligned} \quad (4)$$

donde el último paso explota la suposición de Markov que especifica que el estado es completo, es decir, $p(\mathbf{z}_k|\mathbf{m}_{i,j}, \mathbf{z}_{1:k-1}) = p(\mathbf{z}_k|\mathbf{m}_{i,j})$. Aplicando de nuevo la regla de Bayes al término $p(\mathbf{z}_k|\mathbf{m}_{i,j})$ tenemos que:

$$Bel_k(\mathbf{m}_{i,j}) = \frac{p(\mathbf{m}_{i,j}|\mathbf{z}_k) p(\mathbf{z}_k) p(\mathbf{m}_{i,j}|\mathbf{z}_{1:k-1})}{p(\mathbf{m}_{i,j}) p(\mathbf{z}_k|\mathbf{z}_{1:k-1})}. \quad (5)$$

Para eliminar la dependencia de los términos que no son función de \mathbf{m} aplicamos *log-odds*, obteniendo una expresión alternativa del filtrado que simplifica el proceso de actualización al considerar nuevas observaciones:

$$\begin{aligned} lod_{i,j}^k &= \log \left(\frac{Bel_k(\mathbf{m}_{i,j})}{Bel_k(\neg \mathbf{m}_{i,j})} \right) \\ &= \log \left(\frac{p(\mathbf{m}_{i,j}|\mathbf{z}_k)}{p(\neg \mathbf{m}_{i,j}|\mathbf{z}_k)} \right) + \log \left(\frac{p(\neg \mathbf{m}_{i,j})}{p(\mathbf{m}_{i,j})} \right) \\ &\quad + \log \left(\frac{p(\mathbf{m}_{i,j}|\mathbf{z}_{1:k-1})}{p(\neg \mathbf{m}_{i,j}|\mathbf{z}_{1:k-1})} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Analizando esta ecuación observamos que el log-odds de nuestro filtro se compone de tres términos: el primero hace referencia al posterior dada la observación actual, cuyo cálculo se detalla en la Sección 5.1. El segundo término es el prior del log-odds ($lod_{i,j}^0$). En este trabajo suponemos que

no existe conocimiento a priori sobre la localización de la fuente, por lo que todos los mapas de dispersión son igualmente probables, o lo que es lo mismo $p(\mathbf{m}_{i,j}) = 1/N_d$. Finalmente, el último término hace referencia al log-odds del belief en el instante $k-1$, lo cual nos permite obtener la formula recursiva del filtro:

$$lod_{i,j}^k = \log \left(\frac{p(\mathbf{m}_{i,j}|\mathbf{z}_k)}{1 - p(\mathbf{m}_{i,j}|\mathbf{z}_k)} \right) + lod_{i,j}^0 + lod_{i,j}^{k-1} \quad (7)$$

Para recuperar la probabilidad de cada $\mathbf{m}_{i,j}$ en el instante k se utiliza la siguiente relación:

$$p(\mathbf{m}_{i,j}|\mathbf{z}_{1:k}) = 1 - \left(e^{lod_{i,j}^k} \right)^{-1} \quad (8)$$

5.3. Evaluación

Una vez estimadas las probabilidades a posteriori de los mapas de dispersión, evaluamos si la solución obtenida converge a un caso particular $\mathbf{m}_{i,j}$. Para ello imponemos la condición $p(\mathbf{m}_{i,j}|\mathbf{z}_{1:k}) \geq p_{th}$ durante un periodo de tiempo t_{th} . Si dicha condición se cumple, se declara la fuente como encontrada en la zona r_i , mientras que si no se cumple, el robot selecciona la siguiente posición para moverse siguiendo la estrategia descrita en el apartado siguiente, volviendo a tomar una nueva observación.

5.4. Estrategia de Movimiento del Robot

Diversas son las estrategias de movimiento que pueden implementarse atendiendo a $p(\mathbf{m}_{i,j}|\mathbf{z}_{1:k})$. En este trabajo optamos por una solución simple, proponiendo un desplazamiento del robot hacia la zona r_i^* correspondiente al mapa de dispersión más probable:

$$r_i^* = \underset{i}{\operatorname{argm\acute{a}x}} p(\mathbf{m}_{i,j}|\mathbf{z}_{1:k}) \quad (9)$$

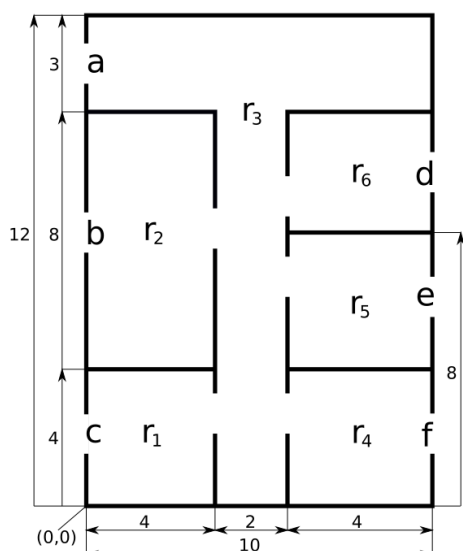


Figura 5: Entorno de prueba compuesto de seis zonas ($r_1 - r_6$) y seis aperturas al exterior ($a - f$) (todas las distancias están expresadas en metros).

Al tratarse de un entorno con obstáculos, asumimos que el robot dispone de sistemas de navegación reactiva y de planificación de caminos, permitiéndole determinar los comandos de movimiento necesarios para alcanzar el objetivo propuesto.

6. Experimentos y Resultados

Con intención de verificar el funcionamiento del método propuesto, en este apartado se realizan un total de 36 experimentos en los que el objetivo es determinar la zona de emisión de la fuente en el entorno que aparece en la Fig. 5. En cada experimento, el robot parte desde la posición $(x, y) = (0, 0)$ desplazándose una celda en cada instante de tiempo (siendo 10cm el tamaño de los lados de la celda), en dirección a la zona de emisión r_i correspondiente al mapa de dispersión de máxima probabilidad. Para la toma de observaciones, el robot está equipado con un sensor de gas con $\sigma_c = 0,1ppm$ y un anemómetro que mide el módulo y dirección del viento con $\sigma_u = \sigma_v = 0,2m/s$.

Para generar el conjunto de mapas de dispersión \mathbf{m} se ha simulado en primer lugar el conjunto de mapas de viento \mathbf{v} para todos los casos donde dos de las aperturas están abiertas simultáneamente mientras que el resto permanecen cerradas, de forma que el viento (de módulo $1m/s$ en la posición de la apertura por la que entra) circula de una a otra y viceversa, obteniendo $N_v = 30$ condiciones de viento. A continuación, se han realizado las simulaciones de dispersión de gas, situando la fuente (que libera gas a razón de $10ppm/s$) en cada una de las $N_r = 6$ zonas, para cada uno de los mapas

de viento, obteniendo un total de $N_d = 180$ mapas de dispersión.

A partir de esta configuración, se ha generado un nuevo conjunto de 36 mapas de dispersión (que no forman parte de \mathbf{m}), para validar el funcionamiento del método propuesto. Estos mapas han sido generados de forma que la dispersión del gas afecta a gran parte del entorno (es decir, colocando la fuente de gas en el flujo principal del viento), lo cual garantiza poder detectar la emisión de gas desde la distancia y posibilitar su localización.

6.1. Análisis de los resultados

La figura 6 muestra uno de los 36 experimentos realizados, donde se puede observar como el gas emitido se dispersa por efectos del viento, afectando a diversas habitaciones del entorno (a). El resto de sub-figuras (b-e) muestra la evolución, para diversos instantes de tiempo, de la trayectoria del robot hacia la zona de máxima probabilidad y el peso que se otorga a cada uno de los mapas de dispersión $\mathbf{m}_{i,j}$.

Para determinar la eficiencia del método, se ha realizado una comparación del tiempo que emplea el robot en la búsqueda de la fuente para los 36 experimentos frente a una búsqueda secuencial, cuyos resultados aparecen en la figura 7. En la búsqueda secuencial el robot recorre una a una las habitaciones del entorno, dirigiéndose al centro de éstas en el siguiente orden preestablecido ($r_1, r_4, r_5, r_2, r_6, r_3$). Como se observa, nuestro método reduce en la mayoría de los casos el tiempo empleado, obteniendo una mejora media del 31 % con respecto a la búsqueda secuencial, acentuándose esta ganancia cuando la distancia inicial a la fuente se hace mayor.

7. Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo se ha abordado el problema de localizar una fuente de gas en un entorno donde existen múltiples habitaciones y obstáculos que determinan el comportamiento de la dispersión de la sustancia volátil que se libera. El enfoque propuesto está basado en el uso de un robot móvil con capacidad olfativa, el cual estima la localización de la fuente en cada instante de tiempo atendiendo a una serie de medidas sensoriales (gas y viento). Concretamente, hemos presentado un novedoso método probabilístico basado en un filtrado Bayesiano de un conjunto de mapas de dispersión simulados, el cual determina de forma iterativa la zona de emisión de máxima probabilidad en cada instante de tiempo. Para validar el funcionamiento del algoritmo se han presentado los resultados de un conjunto de experimentos realizados en un

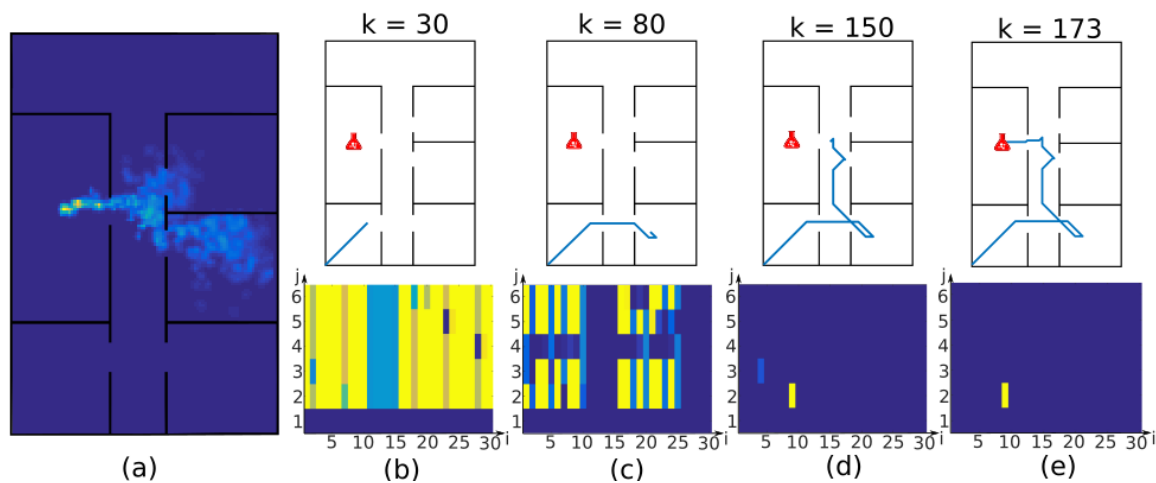


Figura 6: Resultado de la búsqueda de la zona de emisión de la fuente para una de las simulaciones. El mapa en (a) muestra la concentración de gas existente en el entorno. El subconjunto de mapas (b-e) ilustra la trayectoria del robot en los instantes de tiempo k y el nivel de creencia para el conjunto m de mapas de dispersión (en amarillo los mapas para los que el robot determina una mayor creencia y en azul para los descartados).

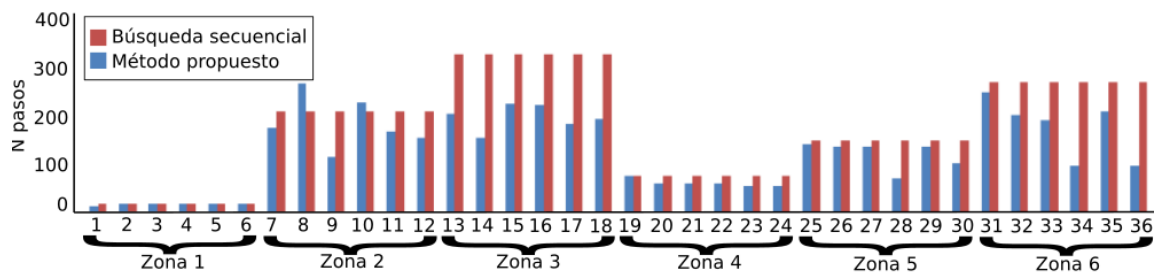


Figura 7: Comparación del número de pasos para los 36 experimentos de búsqueda de la zona de emisión de la fuente de gas considerados en este trabajo. Las llaves inferiores indican la zona en la que se encuentra la fuente en cada experimento.

entorno complejo formado por múltiples habitaciones conexas. Estos resultados han demostrado la aplicabilidad del método propuesto para la localización de fuentes de gas en entornos reales, mostrando una mejora media del 31 % en el tiempo de búsqueda en comparación con un algoritmo secuencial.

En próximos trabajos se estudiará el uso de otros tipos de informaciones existentes en el entorno que puedan indicar la localización de la fuente de gas, como pueden ser la visión o la información semántica. Se pretende estudiar el uso de distintas estrategias de movimiento, como moverse en la dirección de máxima información o en la dirección que minimice la entropía sobre la información de la posición de la fuente. También se abordará la segunda parte en la que se ha dividido el problema de localización, estudiando distintas estrategias para declarar la posición exacta de la fuente en la zona.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado a través del plan nacional, gobierno de España (proyecto DPI2014-55826-R) y por la junta de Andalucía (proyecto de excelencia TEP2012-530).

Referencias

- [1] B. Bayat, N. Crasta, A. Crespi, A. M. Pascoal, and A. Ijspeert. Environmental monitoring using autonomous vehicles: a survey of recent searching techniques. *Current Opinion in Biotechnology*, 45:76–84, 2017.
- [2] G. A. Bird. Molecular gas dynamics. *NASA STI/Recon Technical Report A*, 76, 1976.
- [3] J. L. Blanco, J. G. Monroy, A. Lilienthal, and J. Gonzalez-Jimenez. A kalman filter based approach to probabilistic gas distribution mapping. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Applied Computing*, pages 217–222. ACM, 2013.
- [4] L. Buscemi, M. Prati, and G. Sandini. Cellu-

- lar robotics: behaviour in polluted environments. 1994.
- [5] J. A. Farrell, J. Murlis, X. Long, W. Li, and R. T. Cardé. Filament-based atmospheric dispersion model to achieve short time-scale structure of odor plumes. *Environmental fluid mechanics*, 2(1):143–169, 2002.
 - [6] J. A. Farrell, S. Pang, and W. Li. Chemical plume tracing via an autonomous underwater vehicle. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30(2):428–442, 2005.
 - [7] V. Genovese, P. Dario, R. Magni, and L. Odetti. Self organizing behavior and swarm intelligence in a pack of mobile miniature robots in search of pollutants. In *Intelligent Robots and Systems, 1992., Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 3, pages 1575–1582. IEEE, 1992.
 - [8] F. W. Grasso, J. H. Dale, T. R. Consi, D. C. Mountain, and J. Atema. Behavior of purely chemotactic robot lobster reveals different odor dispersal patterns in the jet region and the patch field of a turbulent plume. *The Biological Bulletin*, 191(2):312–313, 1996.
 - [9] M. Hutchinson, H. Oh, and W.-H. Chen. A review of source term estimation methods for atmospheric dispersion events using static or mobile sensors. *Information Fusion*, 36:130–148, 2017.
 - [10] H. Ishida, K. Hayashi, M. Takakusaki, T. Nakamoto, T. Moriizumi, and R. Kanzaki. Odour-source localization system mimicking behaviour of silkworm moth. *Sensors and Actuators A: Physical*, 51(2-3):225–230, 1995.
 - [11] G. Kowadlo and R. A. Russell. Robot odor localization: a taxonomy and survey. *The International Journal of Robotics Research*, 27(8):869–894, 2008.
 - [12] Y. Kuwana, I. Shimoyama, and H. Miura. Steering control of a mobile robot using insect antennae. In *Intelligent Robots and Systems 95. 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots', Proceedings. 1995 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 2, pages 530–535. IEEE, 1995.
 - [13] A. J. Lilienthal, D. Reimann, and A. Zell. Gas source tracing with a mobile robot using an adapted moth strategy. In *AMS*, pages 150–160, 2003.
 - [14] J. Monroy, V. Hernandez-Bennets, H. Fan, A. Lilienthal, and J. Gonzalez-Jimenez. Gaden: A 3d gas dispersion simulator for mobile robot olfaction in realistic environments. *Sensors*, 17(7):1479, 2017.
 - [15] J. G. Monroy, J.-L. Blanco, and J. G. Jiménez. Time-variant gas distribution mapping with obstacle information. *Auton. Robots*, 40(1):1–16, 2016.
 - [16] J. G. Monroy, M. Jaimez, and J. Gonzalez-Jimenez. Online estimation of 2d wind maps for olfactory robots. 2017.
 - [17] S. Pang and J. A. Farrell. Chemical plume source localization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 36(5):1068–1080, 2006.
 - [18] P. Pyk, S. Bermúdez i Badia, U. Bernardet, P. Knüsel, M. Carlsson, J. Gu, E. Chanie, B. S. Hansson, T. C. Pearce, and P. F. J. Verschuer. An artificial moth: Chemical source localization using a robot based neuronal model of moth optomotor anemotactic search. *Autonomous Robots*, 20(3):197–213, 2006.
 - [19] R. Rozas, J. Morales, and D. Vega. Artificial smell detection for robotic navigation. In *Advanced Robotics, 1991. 'Robots in Unstructured Environments', 91 ICAR., Fifth International Conference on*, pages 1730–1733. IEEE, 1991.
 - [20] J.-R. Ruiz-Sarmiento, C. Galindo, and J. Gonzalez-Jimenez. Building multiversal semantic maps for mobile robot operation. *Knowledge-Based Systems*, 119:257–272, 2017.
 - [21] R. A. Russell, A. Bab-Hadiashar, R. L. Shepherd, and G. G. Wallace. A comparison of reactive robot chemotaxis algorithms. *Robotics and Autonomous Systems*, 45(2):83–97, 2003.
 - [22] C. Sanchez-Garrido, J. G. Monroy, and J. Gonzalez-Jimenez. A configurable smart e-nose for spatio-temporal olfactory analysis. In *SENSORS, 2014 IEEE*, pages 1968–1971. IEEE, 2014.
 - [23] B. I. Shraiman and E. D. Siggia. Scalar turbulence. *Nature*, 405(6787):639–646, 2000.
 - [24] L. Shu, M. Mukherjee, X. Xu, K. Wang, and X. Wu. A survey on gas leakage source detection and boundary tracking with wireless sensor networks. *IEEE Access*, 4:1700–1715, 2016.
 - [25] M. Vergassola, E. Villermaux, and B. I. Shraiman. ‘infotaxis’ as a strategy for searching without gradients. *Nature*, 445(7126):406–409, 2007.
 - [26] S. Vijayakumaran, Y. Levinbook, and T. F. Wong. Maximum likelihood localization of a diffusive point source using binary observations. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 55(2):665–676, 2007.

MANIPULADOR AÉREO CON BRAZOS ANTROPOMÓRFICOS DE ARTICULACIONES FLEXIBLES

Alejandro Suárez Fernández-Miranda
Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, asuarezfm@us.es

Guillermo Heredia Benot, Aníbal Ollero Baturone
Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, guiller@us.es, aollero@us.es

Resumen

Este artículo presenta el primer robot manipulador aéreo con dos brazos antropomórficos diseñado para aplicarse en tareas de inspección y mantenimiento en entornos industriales de difícil acceso para operarios humanos. El robot consiste en una plataforma aérea multirotor equipada con dos brazos antropomórficos ultraligeros, así como el sistema de control integrado de la plataforma y los brazos. Una de las principales características del manipulador es la flexibilidad mecánica proporcionada en todas las articulaciones, lo que aumenta la seguridad en las interacciones físicas con el entorno y la protección del propio robot. Para ello se ha introducido un compacto y simple mecanismo de transmisión por muelle entre el eje del servo y el enlace de salida. La estructura en aluminio de los brazos ha sido cuidadosamente diseñada de forma que los actuadores estén aislados frente a cargas radiales y axiales que los puedan dañar. El manipulador desarrollado ha sido validado a través de experimentos en base fija y en pruebas de vuelo en exteriores.

Palabras Clave: manipulación aérea, manipulador bi-brazo, diseño antropomórfico, deflexión articular.

1 INTRODUCCIÓN

Dentro de la robótica, el campo de la manipulación aérea tiene por objetivo desarrollar sistemas aéreos no tripulados (UAV's, *Unmanned Aerial Vehicles*) equipados con uno o múltiples brazos robóticos que proporcionen cierta destreza para la realización de tareas en lugares de difícil acceso o alto riesgo para humanos. Considérese por ejemplo la inspección y reparación de grietas en palas de aerogeneradores mediante cámaras, la detección y reparación de fugas de líquido o gas en tuberías de la industria química, la inspección por contacto en puentes, así como el mantenimiento de torres de alta tensión. La solución convencional planteada en estos escenarios consiste en el transporte y despliegue de operarios montados en grúas o colgados de arneses para alcanzar el espacio de trabajo. Este tipo de tareas, aun siendo de

corta duración, conllevan riesgo para los trabajadores y pueden suponer un coste significativo para las empresas debido al número de recursos involucrados, especialmente si se deben realizar periódicamente.

La manipulación aérea es un área de investigación muy reciente que ha centrado la atención de diversos grupos de investigación y empresas internacionales, en cuyo nacimiento ha jugado un importante papel el proyecto ARCAS [3] financiado por la Comisión Europea. Actualmente, los proyectos AEROARMS [1], financiado también por la Comisión Europea, y el proyecto AEROMAIN, en los cuáles se encuadra este trabajo, siguen contribuyendo de forma notable al campo de la manipulación aérea. El objetivo de estos proyectos es el desarrollo de sistemas robóticos con capacidades de manipulación y percepción avanzadas para la inspección y mantenimiento en entornos industriales. Las plataformas utilizadas son de tipo helicóptero o multirotor, éstas en sus distintas variantes: quadrotor, hexarotor u octotoror. En [9], se presenta la integración de un robot industrial de siete grados de libertad en un helicóptero autónomo, mientras que en [14] se describe un helicóptero con manipulador flexible para el agarre y transporte de objetos. Se han desarrollado varios prototipos de manipuladores aéreos basados en plataforma de tipo quadrotor, integrando brazos articulados de dos, tres, cinco o seis grados de libertad [8][7][5][6]. En [10] se propone un dispositivo de pocos grados de libertad para cerrar una válvula mediante manipulación dual, y en [19] se presentó por primera vez un manipulador bi-brazo de tamaño humano, antecedente directo del que se presenta en este artículo. Recientemente se han presentado algunos prototipos de manipuladores flexibles para su aplicación en robótica aérea [4]. En [18] se analiza la interacción de una articulación flexible en contacto con el entorno. En [16] se demuestra la aplicación de la flexibilidad mecánica de la articulación del codo para la estimación del peso de los objetos y para la detección y reacción frente a colisiones, mientras que en [17] se amplía el trabajo anterior a la estimación y control de par y fuerza de contacto y a la localización de obstáculos con baja energía de impacto. Desde un punto de vista teórico, el modelado y control [11] de un robot de base flotante equipado con uno o más manipuladores

robóticos [13] es un problema complejo debido al acoplamiento dinámico entre la plataforma aérea y el manipulador, y al carácter intrínsecamente inestable de los vehículos aéreos de tipo multirotor [12].

La principal aportación de este trabajo es presentar las características y experimentos de un manipulador aéreo equipado con dos brazos antropomórficos de cuatro grados de libertad diseñado para manipulación dual y desarrollado en el Grupo de Robótica, Visión y Control (GRVC) de la Universidad de Sevilla. Este robot es el primero de sus características desarrollado en el mundo. En la Figura 1 se muestra una imagen del manipulador realizando una operación de agarre con dos manos en vuelo en exteriores.



Figura 1: Manipulador aéreo bi-brazo realizando una operación de agarre en vuelo.

El resto del artículo está organizado de la siguiente forma. La Sección 2 describe el manipulador aéreo de brazos antropomórficos, planteando en la Sección 3 el modelo cinemático y dinámico de los brazos de articulaciones flexibles. Los modos de operación implementados se detallan en la Sección 4. En la Sección 5 se presentan los resultados experimentales, y las conclusiones en la Sección 6.

2 MANIPULADOR AÉREO CON BRAZOS ANTROMÓRFICOS

El manipulador aéreo desarrollado se muestra en la Figura 1. La plataforma aérea es un hexarotor del fabricante Drone Tools equipado con un ordenador Intel NUC donde se ejecuta el programa de control de los brazos y el módulo de visión, una cámara ZED para el guiado visual de los brazos, un enlace radio en la banda de 5.8 GHz, y los brazos antropomórficos con articulaciones flexibles desarrollado en el Grupo de Robótica, Visión y Control de la Universidad de Sevilla. Este manipulador bi-brazo ultraligero ha sido diseñado específicamente para su uso en aplicaciones de manipulación aérea en exteriores. Se introduce aquí el término ultraligero para destacar la diferencia de peso de estos brazos (1.3 kg en total) con respecto a los manipuladores “lightweight” (~15 kg por brazo) utilizados en la industrial (KUKA, DLR).

Los brazos han sido diseñados siguiendo un enfoque bioinspirado, eligiendo una configuración cinemática antropomórfica de cuatro grados de libertad (tres de hombro y codo), siendo además de tamaño humano. Esto permite replicar de forma inmediata e intuitiva los movimientos de un operador humano en el robot. Los actuadores utilizados son los servos Herkulex del fabricante coreano Dongbu Robot, modelos DRS-0101, y DRS-0201, mientras que la estructura ha sido fabricada en aluminio a partir de secciones de perfil plano de diferentes espesores. La Figura 2 muestra el manipulador con más detalle. Una de las principales características del diseño es la flexibilidad mecánica de todas las articulaciones. Un mecanismo de doble muelle con palanca ha sido integrado entre el eje del servo y el enlace de salida de cada articulación. Este mecanismo de transmisión elástica permite estimar y controlar el esfuerzo de cada articulación midiendo la deflexión de los muelles, lo que resulta de especial interés durante la interacción física del manipulador aéreo con el entorno. La rotación relativa del enlace de salida con respecto al eje del servo, denominada aquí como deflexión, es posible gracias a una pareja de cojinetes esféricos del fabricante igus® fijados a la estructura de aluminio. Por otra parte, se impuso como condición de diseño que los ejes de las cuatro articulaciones de cortasen en un punto, de forma que la resolución de la cinemática se simplificase y fuese analítica. El efector final consiste en una herramienta simple de agarre con un micro-ruptor frontal para detectar el contacto físico con los objetos.

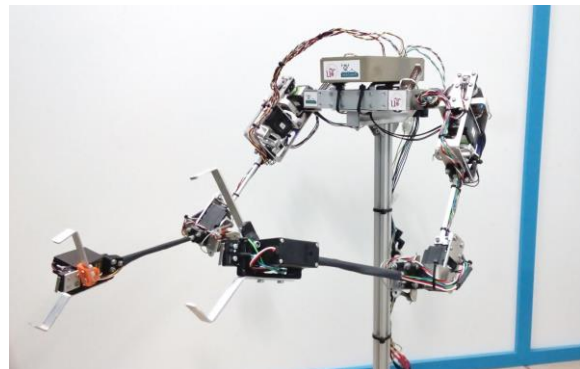


Figura 2: Manipulador antropomórfico bi-brazo de articulaciones flexibles.

Las especificaciones más destacadas del manipulador se recogen en la Tabla 1, mientras que en la Figura 3 se representa la arquitectura hardware/software. Aquí el componente principal es el gestor de tareas, el cuál implementa los modos de operación descritos en la Sección 4. La plataforma hexarotor proporciona una carga máxima de 2.5 kg, con un tiempo de vuelo en torno a 15 minutos llevando el manipulador bi-brazo.

Tabla 1: Especificaciones del manipulador bi-brazo

Peso total	1.3 [kg]
Capacidad carga	~0.2 [kg] cada brazo

Nº articulaciones	3 hombro + 1 codo
Dimensiones	Alcance máximo: 50 [cm] Separación brazos: 32 [cm]
Rango de rotación	± 90 , $[-10, 90]$, ± 90 , ± 120 [$^\circ$]
Par de bloqueo	24, 24, 12, 24 [kg·cm]
Deflexión máxima	± 15 [grados]

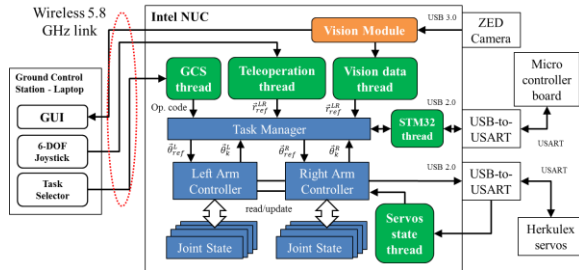


Figura 3: Arquitectura software y componentes del manipulador bi-brazo antropomórfico.

3 MODELO DEL MANIPULADOR

En esta sección se presenta el modelado geométrico y cinemático del manipulador antropomórfico bi-brazo, cubriendo también en parte el modelado dinámico. El modelo completo del manipulador aéreo está fuera del alcance de este trabajo.

La posición de una articulación flexible se determina a partir de tres variables relacionadas:

- La posición angular del eje del servo, θ_j^i
- La posición angular del enlace de salida, q_j^i
- El ángulo de deflexión, $\Delta\theta_j^i = q_j^i - \theta_j^i$

Se usará el superíndice $i = \{1, 2\}$ para indicar el brazo y el subíndice $j = \{1, 2, 3, 4\}$ para la articulación. El modelo cinemático se definirá a partir del ángulo q_j^i .

3.1 MODELO GEOMÉTRICO

Los sistemas de coordenadas, variables articulares, el criterio de signo asociado, las longitudes y vectores de posición del manipulador bi-brazo antropomórfico se han representado gráficamente en la Figura 4. En este modelo, L_1 y L_2 son las longitudes de los enlaces del brazo y antebrazo, mientras que D representa la separación entre los brazos. Se denotará por q_1^i , q_2^i , q_3^i y q_4^i al ángulo de rotación de las articulaciones del brazo i -ésimo siguiendo el orden: flexión-extensión (pitch), aducción-abducción (roll), rotación medial-lateral (yaw) de hombro, y flexión-extensión (pitch) del codo. El sentido de giro positivo se obtiene por la regla de la mano derecha, de forma que el pulgar apunta en la dirección positiva del eje de rotación y los los yemas de dedos indican el sentido positivo de giro. Las ecuaciones del modelo cinemático se referirán al sistema de ejes $\{X^i_0 Y^i_0 Z^i_0\}$ asociado a cada brazo. Por último, se denotará por r^i , r^i_{ref} y e^i a la posición del efector final, la posición de referencia, y el error de posición, respectivamente.

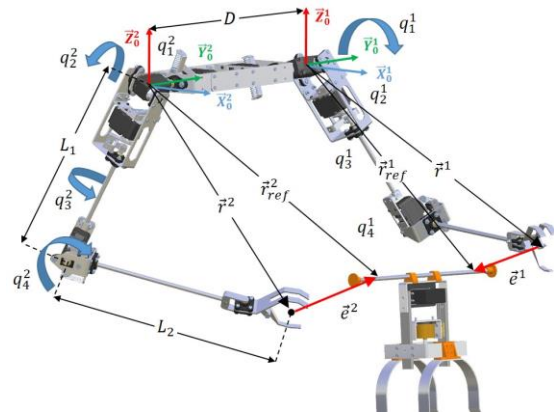


Figura 4: Modelo geométrico del manipulador de brazos antropomórficos. Vista renderizada.

3.2 MODELO CINEMÁTICO

Para la presentación del modelo cinemático directo e inverso se tendrá en cuenta el hecho de que ambos brazos son idénticos en términos de configuración cinemática y tamaño, por lo que las ecuaciones se referirán a un sistema de coordenadas generalizado $\{X^i_0 Y^i_0 Z^i_0\}$.

3.2.1. MODELO CINEMÁTICO DIRECTO

En el modelo cinemático directo, el espacio articular se transforma al espacio Cartesiano por medio de la función $F_i: \mathcal{R}^4 \rightarrow \mathcal{R}^3$. La posición del punto central de agarre r^i se calculará multiplicando las matrices de transformación de cada articulación, ${}^{j-1}_j T(q_j^i)$:

$$r^i(q^i) = F_i(q^i) = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} = \left(\prod_{j=1}^4 {}^{j-1}_j T(q_j^i) \right) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -L_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Las matrices de transformación vienen dadas por:

$${}^0_1 T(q_1^i) = \begin{bmatrix} c_1^i & 0 & s_1^i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s_1^i & 0 & c_1^i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^1_2 T(q_2^i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_2^i & -s_2^i & 0 \\ 0 & s_2^i & c_2^i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^2_3 T(q_3^i) = \begin{bmatrix} c_3^i & -s_3^i & 0 & 0 \\ s_3^i & c_3^i & 0 & 0 \\ 0 & s_2^i & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^3_4 T(q_4^i) = \begin{bmatrix} c_4^i & 0 & s_4^i & 0 \\ 0 & 1 & -s_4^i & 0 \\ -s_4^i & 0 & c_4^i & -L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

donde $c_j^i = \cos(q_j^i)$, y $s_j^i = \sin(q_j^i)$.

3.2.2. MODELO CINEMÁTICO INVERSO

La restricción de diseño de los brazos haciendo que los ejes de rotación de las articulaciones se corten en un punto permite obtener solución analítica para el modelo cinemático inverso. Sin embargo, la función $\Omega_i: \mathcal{R}^3 \rightarrow \mathcal{R}^4$ que permite obtener el valor de las variables articulares a partir de una posición deseada del efector final, presenta infinitas soluciones debido al grado de libertad redundante. El enfoque adoptado en este trabajo es fijar el valor de la articulación roll

del hombro, de forma que $q_2^i = \varphi_i$. El ángulo de giro de esta articulación se ajustará según la operación del brazo, como se verá en la Sección 4. Una vez fijado este ángulo, es posible llegar a una ecuación trigonométrica para calcular el ángulo pitch del hombro (solución omitida por espacio):

$$x^i \cdot \sin(q_1^i) + z^i \cdot \cos(q_1^i) = w_i \quad (3)$$

$$w_i = \frac{L_2^2 - (L_1^2 + x_i^2 + z_i^2) + 2 \cdot L_1 \cdot y_i \cdot \sin(q_2^i)}{2 \cdot L_1 \cdot \cos(q_1^i)} \quad (4)$$

Seguidamente, el ángulo yaw del hombro; esto es, la rotación en torno al enlace del brazo, es calculada:

$$q_3^i = \text{atan2}(a^i, b^i) \quad (5)$$

$$a^i = x_i \cdot s_1^i \cdot s_2^i + y_i \cdot c_2^i + z_i \cdot c_1^i \cdot s_2^i \quad (6)$$

$$b^i = x_i \cdot c_1^i - z_i \cdot s_1^i \quad (7)$$

Por último, la posición articular del codo se obtiene a partir de la posición cartesiana del efector final y de las longitudes de los dos enlaces:

$$q_4^i = -\cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - L_1^2 - L_2^2}{2 \cdot L_1 \cdot L_2}} \right) \quad (8)$$

3.3 MODELO DINÁMICO

Este apartado introduce brevemente el modelado de manipuladores robóticos de articulaciones flexibles. Para una explicación más en detalle se recomienda el artículo [2]. Como se indicó anteriormente, el ángulo de deflexión se define como la diferencia entre el ángulo del eje del servo y la posición angular del enlace de salida. El mecanismo de transmisión por muelle-palanca introducido en las articulaciones se asimilará a un amortiguador caracterizado por sus constantes de rigidez k_j^i y fricción d_j^i . Suponiendo que la deflexión es proporcional al par rotacional de la articulación, lo cual es aceptable teniendo en cuenta la relación entre la compresión del muelle y la longitud de la palanca, se tiene que:

$$\tau_j^i = k_j^i \cdot \Delta \theta_j^i + d_j^i \cdot (\dot{q}_j^i - \dot{\theta}_j^i) \quad (9)$$

La derivación de las ecuaciones del modelo dinámico parte del Lagrangiano y de la ecuación generalizada para la fuerza y los pares, donde además de la energía cinética de los actuadores y de los enlaces de salida, se tiene en cuenta la energía potencial elástica de los muelles. Al final, es posible llegar a la formulación matricial típica con los términos de inercia, Coriolis y gravedad, solo que a diferencia de un manipulador de articulaciones rígidas, el modelo se descompone en

dos partes: una ecuación para la dinámica del motor y otra para la dinámica de los enlaces:

$$\mathbf{B}_i(\boldsymbol{\theta}^i) \ddot{\boldsymbol{\theta}}^i + \boldsymbol{\tau}^i = \boldsymbol{\tau}_m^i - \boldsymbol{\tau}_f^i \quad (10)$$

$$\mathbf{M}_i(\mathbf{q}^i) \ddot{\mathbf{q}}^i + \mathbf{C}_i(\mathbf{q}^i, \dot{\mathbf{q}}^i) + \mathbf{G}_i(\mathbf{q}^i) = \boldsymbol{\tau}^i + \boldsymbol{\tau}_{ext}^i \quad (11)$$

En las expresiones anteriores, \mathbf{B}_i y \mathbf{M}_i denotan las matrices generalizadas de inercia de los ejes de los servos y de los enlaces del brazo, respectivamente, \mathbf{C}_i es el vector de par asociado a fuerzas centrífugas y de Coriolis, mientras que \mathbf{G}_i es el par gravitatorio. El par generado por el motor, $\boldsymbol{\tau}_m^i$, se gasta en compensar la fricción de la reductora, $\boldsymbol{\tau}_f^i$, en acelerar el eje de salida del servo y en la transmisión de movimiento a los enlaces a través de los muelles, $\boldsymbol{\tau}^i$. Por último, $\boldsymbol{\tau}_{ext}^i$ representa el par de las articulaciones debido a fuerzas externas, típicamente fuerzas de contacto.

4 MODOS DE OPERACIÓN DEL MANIPULADOR

Esta sección describe algunas operaciones básicas que el manipulador implementa para poder llevar a cabo diferentes tareas de manipulación aérea que involucren el agarre o bien la instalación de sensores, instrumentos o cualquier otro dispositivo.

4.1 POSICIONES DE OPERACIÓN

El movimiento de los brazos robóticos instalados en la base de la plataforma aérea se verá restringido por el tren de aterrizaje y por obstáculos en el entorno. En primer lugar, durante las operaciones de despegue y aterrizaje, los brazos deberán estar en una posición tal que, tanto el codo como el efector final, queden por encima del plano del suelo, es decir, por encima del tren de aterrizaje. Atendiendo a la Figura 5, la forma más inmediata de elevar los brazos para alcanzar esta configuración es mediante la rotación de la segunda articulación del hombro (ángulo roll), y doblando el codo para contraer el antebrazo:

$$\mathbf{q}_{despegue}^{1,2} = \left[0 \quad \pm \frac{\pi}{2} \quad 0 \quad -\frac{\pi}{2} \right]^T \quad (12)$$

Puesto que la operación de aterrizaje resulta más crítica que la de despegue en términos de seguridad, es conveniente definir una posición de referencia de los brazos que permita pasar de forma rápida y fiable de la postura habitual de manipulación a la posición de despegue. Esta posición de operación, mostrada en la Figura 5, se ha definido para evitar que los brazos choquen entre ellos o con el tren de aterrizaje durante el movimiento de recogida. La posición articular es:

$$\mathbf{q}_{operación}^{1,2} = \left[0 \quad 0 \quad 0 \quad -\frac{\pi}{2} \right]^T \quad (13)$$



Figura 5: Posición de despegue/aterizaje (izquierda) y posición de operación (derecha).

4.2 OPERACIÓN MANUAL

En ciertas aplicaciones será necesario que el operador del manipulador pueda guiar manualmente el efector final, por ejemplo para agarrar algún objeto o para interactuar con un dispositivo o sensor. Por ello, se ha desarrollado un modo de operación que permite desplazar el efector final de ambos brazos en el espacio cartesiano de forma simultánea utilizando un único joystick. El esquema de control implementado es el que se muestra en la Figura 6. El ratón de seis grados de libertad Space Navigator de 3DConnexion sirve de interfaz de control para el usuario, generando a su salida la referencia de velocidad cartesiana que, al ser integrada, pasa a ser una referencia incremental de posición. A ésta se le añade la posición actual del efector final calculada a partir del modelo cinemático directo descrito en la Sección 3.2. Las referencias de posición cartesiana se transforman seguidamente al espacio articular aplicando el modelo cinemático inverso. Los controladores de bajo nivel de ambos brazos se encargan de generar una trayectoria suave aprovechando el perfil de velocidad trapezoidal que cada servo genera internamente. Los tres grados de libertad de orientación del ratón permiten ajustar la posición relativa de un brazo respecto a otro. Esto es, lo que se controla es la orientación del segmento imaginario que une el efector final de ambos brazos, rotando entorno al punto medio de dicho segmento.

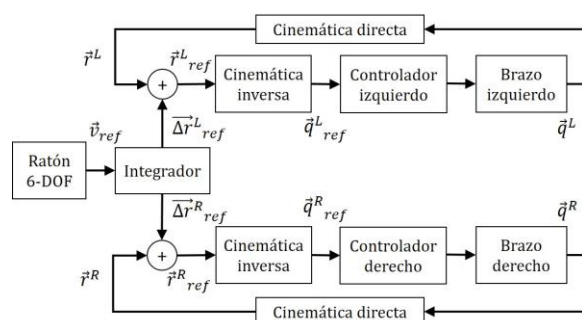


Figura 6: Esquema de guiado manual del efector final izquierdo y derecho con un único joystick de 6-DOF.

4.3 GUIADO VISUAL

El agarre de un objeto en vuelo realizado de forma manual por un operador en tierra puede ser inviable si la plataforma aérea se ve afectada por oscilaciones debido al viento o a otros efectos aerodinámicos y de

control. Téngase en cuenta que las operaciones de manipulación sobre base móvil requieren de un cierto nivel de coordinación, destreza y velocidad que los humanos no pueden alcanzar a no ser que se tengan un entrenamiento intensivo especializado. Por este motivo, se ha desarrollado en este trabajo un sistema de guiado visual para el agarre de un objeto con asas. El algoritmo de visión utilizado [15] proporciona los puntos de agarre 3D relativos a los ejes de la cámara, transformados luego al sistema de ejes de cada brazo. El método de guiado consiste en aproximar el efector final al respectivo punto de agarre con velocidad constante y siguiendo la dirección del vector de error, definido como:

$$\mathbf{e}^i = \mathbf{r}_{obj}^i - \mathbf{r}^i \quad (14)$$

Aquí \mathbf{r}^i y \mathbf{r}_{obj}^i son la posición actual y objetivo dada por visión del efector final del i -ésimo brazo. En cada iteración del controlador, la referencia de posición se calculará de la siguiente forma:

$$\mathbf{r}_{ref}^i = \mathbf{r}^i + v \cdot T \cdot \frac{\mathbf{e}^i}{\|\mathbf{e}^i\|} + \mathbf{r}_G^i \quad (15)$$

En la ecuación anterior, v es la velocidad deseada de aproximación al punto de agarre, T es el período de control, mientras que el término \mathbf{r}_G^i compensa las deflexiones estáticas por gravedad. El esquema de control implementado es muy similar al descrito en la Figura 6: las referencias de posición cartesianas son transformadas a referencias articulares aplicando el modelo cinemático inverso. Luego, el controlador de cada brazo genera los comandos de movimiento que son enviados a cada uno de los servos.

4.4 AGARRE POR CONTACTO MECÁNICO

La fiabilidad de una operación de agarre puede ser incrementada incorporando mecanismos de detección de contacto, de forma que el efector final se cierre al producirse un cambio de nivel en un micro-ruptor. En la Figura 2 se puede ver este mecanismo instalado en la parte delantera del servo de la mano. No obstante, este modo de operación debe complementarse con el modo manual para abrir el efector final cuando sea conveniente.

5 RESULTADOS

5.1 GUIADO VISUAL Y AGARRE

El método de agarre descrito en la Sección 4.3 se ha evaluado experimentalmente en base fija antes de ser aplicado en vuelo (ver Sección 5.4). El objeto a coger era una caja de plástico con una barra circular de 8 mm de sección y 35 cm de largo instalada sobre ella a modo de asa. Los extremos de la barra se cerraron

con dos piezas cuadradas de plástico para evitar el deslizamiento. Se instaló una cámara ZED sobre la estructura de los hombros orientada 45 grados hacia abajo, proporcionando un campo de visión horizontal de 120 grados. El algoritmo de visión [15] utiliza un modelo del objeto basado en características visuales aprendido previamente para detectarlo y localizarlo. Los puntos de agarre sobre las asas se obtienen a partir del sistema de referencia asociado a la caja.

La trayectoria seguida por cada uno de los brazos, así como la referencia de control y la posición objetivo dada por el módulo de visión durante el experimento de guiado visual y agarre se representa en la Figura 7. Los brazos parten de la posición de operación dada por la ecuación (13), alcanzando el objetivo situado enfrente en tres segundos. Se impuso una velocidad deseada de $v = 0.2$ m/s, siendo el período de control de $T = 0.1$ segundos. Aunque la tasa de control pueda parecer baja, hay que tener en cuenta que se trata de una referencia de posición en un sistema mecánico, y que el controlador interno de cada servo se ejecuta a 100 Hz aproximadamente.

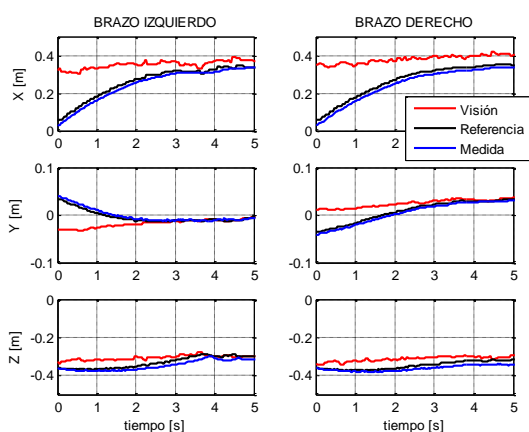


Figura 7: Trayectoria cartesiana del efector final en el experimento de agarre con realimentación visual.

El cierre del efector final en este experimento se hizo de forma manual utilizando los botones del ratón de seis grados de libertad Space Navigator, conmutando de abierto a cerrado con cada pulsación.

5.2 RESPUESTA A IMPACTO DE LAS ARTICULACIONES FLEXIBLES

El objetivo de este experimento es mostrar el efecto de las articulaciones flexibles cuando el efector final sufre el impacto de un objeto de 62 gramos de peso al caer desde una altura de 57 cm, lo que corresponde a una energía potencial de 0.35 J. En la Figura 8 se ha representado la aceleración del efector final, medida con un acelerómetro instalado en la base del mismo, junto con la medida de deflexión de la articulación de codo y hombro dada por los potenciómetros. Como

se ve, los muelles actúan como filtro paso-baja, de forma que las componentes de alta frecuencia de la aceleración no son transmitidas al eje del servo, lo que resulta conveniente para proteger al actuador.

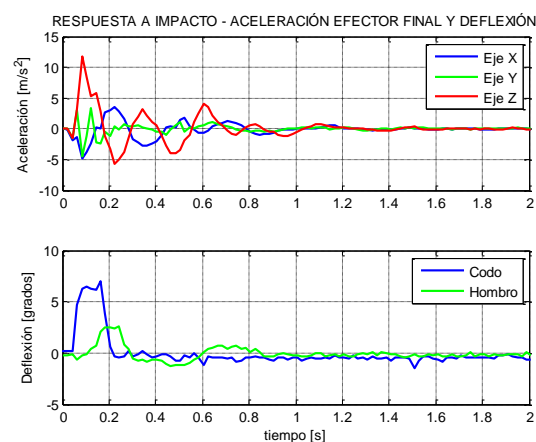


Figura 8: Respuesta a impacto del brazo izquierdo: aceleración del efector final y deflexión articular.

5.3 GUIADO MANUAL CON AGARRE EN CADENA CINEMÁTICA CERRADA

Este experimento describe una aplicación interesante de la flexibilidad articular mecánica en combinación con el guiado visual en condiciones de agarre. Nótese que si el punto de agarre del objeto coincide con la posición del propio efector final, el vector de error de la ecuación (14) representaría la deflexión mecánica en el espacio cartesiano del manipulador. Esto exige que la posición \mathbf{r}^i se calcule teniendo en cuenta únicamente las posiciones articulares de los servos sin considerar la deflexión articular; es decir, que se trata de un manipulador rígido equivalente.

Cuando el modo de operación de guiado visual está activo, el efecto que se produce es el de un control de impedancia en el espacio cartesiano, ya que el objetivo de control es anular la deflexión (fuerza) mecánica de los muelles del manipulador. En la Figura 9 se puede ver la trayectoria del efector final del brazo izquierdo cuando el objeto agarrado es guiado manualmente, primero de arriba abajo (eje Z), luego de izquierda a derecha (eje Y), con pequeños desplazamientos en el eje X. Lo que ocurre es lo siguiente. El manipulador se encuentra inicialmente agarrando el objeto sin que se aplique ninguna fuerza externa sobre él, por lo que $\mathbf{e}^i = \mathbf{0}$ y la deflexión será nula. En un momento dado, el objeto es empujado, lo causa la deflexión instantánea de las articulaciones. El módulo de visión mide un desplazamiento del punto de agarre (el cuál coincide con el efector final) con respecto al instante anterior, por lo que el vector de error \mathbf{e}^i deja de ser nulo. Entonces el método de guiado descrito en la Sección 4.3 actúa sobre los brazos para corregir esta desviación, haciendo que la

deflexión tienda a cero y facilitando el guiado de los brazos mientras agarran el objeto.

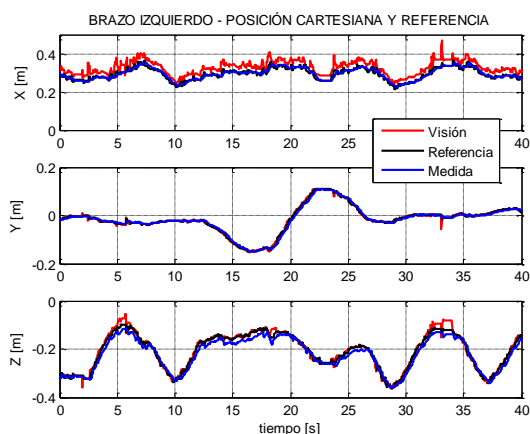


Figura 9: Posición del efector final izquierdo (azul) y del punto de agarre dado por visión (rojo). El brazo sigue el objeto agarrado cuando es desplazado.

5.4 EXPERIMENTOS EN VUELO

El manipulador aéreo de brazos antropomórficos fue evaluado en un experimento de vuelo en exteriores cuyo objetivo era coger un instrumento de inspección instalado sobre una tubería de PVC controlando los dos brazos con el algoritmo de guiado visual descrito en la Sección 5.1. Una vez agarrado, el instrumento se lleva hasta la zona de recogida donde se suelta en una caja, operando los brazos manualmente con el método presentado en la Sección 4.2. Las fases del experimento se han representado en la Figura 10 y en la Figura 11. El manipulador parte de la posición de despegue con los brazos recogidos por encima del suelo en la configuración dada por la Ecuación (12). Una vez la plataforma entra en el espacio de trabajo, los brazos pasan a la posición de operación dada por la Ecuación (13). Seguidamente se activa el modo de guiado visual de los brazos mientras el piloto del UAV acerca la plataforma a la tubería sobre la que está instalado el objeto. Una vez los brazos consiguen agarrar el objeto por sus asas, por seguridad los brazos se llevan de nuevo a la posición de operación. El UAV se guía entonces hacia la zona en la que se depositará el instrumento, operando los brazos con el ratón. Por razones de seguridad, en los experimentos se dispuso una cuerda pasante por polea por encima de la plataforma aérea para que al tirar de ella se evitase el impacto en caso de fallo, sin que afectase de forma significativa a la dinámica del sistema.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha demostrado la viabilidad de los robots aéreos con dos brazos robóticos aplicados a la manipulación dual en vuelo, presentando un sistema

compuesto por una plataforma hexarotor equipada con dos brazos antropomórficos de articulaciones flexibles. Las principales características de los brazos son el bajo peso (1.3 kg), la capacidad de deflexión articular y la robustez mecánica. El artículo cubre el modelado cinemático, introduciendo la dinámica del manipulador de articulaciones flexibles, así como los modos de operación de los brazos. Los experimentos realizados demuestran que la deflexión mecánica no sólo aumenta la seguridad en las interacciones físicas con el entorno, sino que amplía las capacidades del manipulador, permitiendo la estimación y control de fuerzas de contacto o la detección de colisiones.

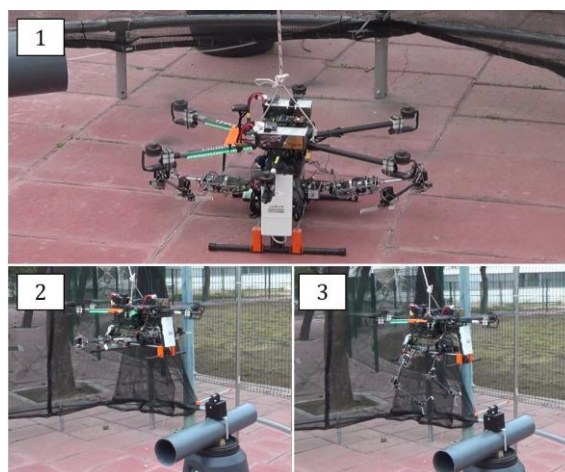


Figura 10: Despegue del manipulador aéreo (1) y transición de posición recogida (2) a operación (3).

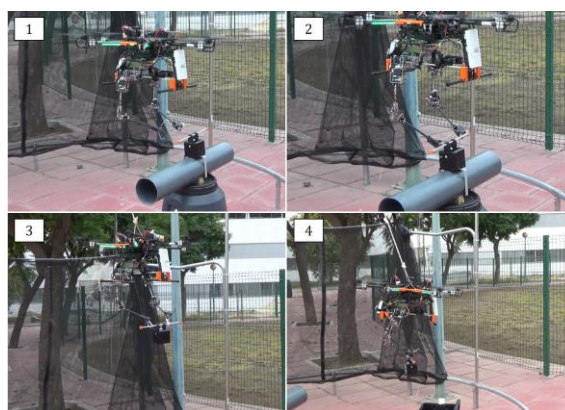


Figura 11: Experimento de agarre: aproximación (1), agarre (2), recuperación (4) y transporte (4).

Agradecimientos

Este trabajo está financiado por el proyecto Español MINECO Retos AEROMAIN (DPI2014-5983-C2-1-R) así como por el proyecto AEROARMS (AERial RObotic system integrating multiple ARMS and advanced manipulation capabilities for inspection and maintenance), número de contrato 644271. La tesis de Alejandro Suárez está financiada por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte a través del programa FPU.

Referencias

- [1] AEROARMS Project: Aerial RObotic system integrating multiple ARMS and advanced manipulation capabilities.
- [2] Albu-Schäffer, A., Ott, C., & Herzinger, G. (2007). A unified passivity-based control framework for position, torque and impedance control of flexible joint robots. *The International Journal of Robotics Research*, 26(1), 23-39.
- [3] ARCAS Project: Aerial Robotics Cooperative Assembly System.
- [4] Bartelds, T., Capra, A., Hamaza, S., Stramigioli, S., & Fumagalli, M. (2016). Compliant aerial manipulators: Toward a new generation of aerial robotic workers. *IEEE RAL*, 1(1), 477-483.
- [5] Bellicoso, C. D., Buonocore, L. R., Lippiello, V., & Siciliano, B. (2015, June). Design, modeling and control of a 5-DoF light-weight robot arm for aerial manipulation. In *Control and Automation (MED)*, 2015 23th Mediterranean Conference on (pp. 853-858). IE.
- [6] Cano, R., Pérez, C., Pruano, F., Ollero, A., & Heredia, G. (2013). Mechanical design of a 6-DOF aerial manipulator for assembling bar structures using UAVs. In *2nd RED-UAS 2013 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems*.
- [7] Jimenez-Cano, A. E., Martin, J., Heredia, G., Ollero, A., & Cano, R. Control of an aerial robot with multi-link arm for assembly tasks. In *Robotics and Automation (ICRA)*, 2013 IEEE International Conference on (pp. 4916-4921).
- [8] Kim, S., Choi, S., & Kim, H. J. Aerial manipulation using a quadrotor with a two dof robotic arm. In *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2013 IEEE/RSJ International Conference on (pp. 4990-4995).
- [9] Kondak, K., Huber, F., Schwarzbach, M., Laiacker, M., Sommer, D., Bejar, M., & Ollero, A. Aerial manipulation robot composed of an autonomous helicopter and a 7 DoF industrial manipulator. In *Robotics and Automation (ICRA)*, 2014 IEEE Int. Conf on (pp. 2107-2112).
- [10] Korpela, C., Orsag, M., & Oh, P.. Towards valve turning using a dual-arm aerial manipulator. In *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*, 2014 IEEE/RSJ International Conference on (pp. 3411-3416).
- [11] Mellinger, D., Lindsey, Q., Shomin, M., & Kumar, V. (2011, September). Design, modeling, estimation and control for aerial grasping and manipulation. In *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2011 IEEE/RSJ Int. Conference on (pp. 2668-2673). IEEE.
- [12] Orsag, M., Korpela, C., & Oh, P. (2013). Modeling and control of MM-UAV: Mobile manipulating unmanned aerial vehicle. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 1-14.
- [13] Papadopoulos, E., & Moosavian, S. A. A. (1994). Dynamics and control of space free-flyers with multiple manipulators. *Advanced robotics*, 9(6), 603-624.
- [14] Pounds, P. E., Bersak, D. R., & Dollar, A. M. (2011, May). The Yale aerial manipulator: grasping in flight. In *Robotics and Automation (ICRA)*, 2011 International Conference on (pp. 2974-2975). IEEE.
- [15] Ramon Soria, P., Arrue, B. C., & Ollero, A. (2017). Detection, Location and Grasping Objects Using a Stereo Sensor on UAV in Outdoor Environments. *Sensors*, 17(1), 103.
- [16] Suarez, A., Heredia, G., & Ollero, A. (2015) Lightweight compliant arm for aerial manipulation. In *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015 IEEE/RSJ Int. Conference on (pp. 1627-1632).
- [17] Suarez, A., Heredia, G., & Ollero, A. Lightweight compliant arm with compliant finger for aerial manipulation and grasping. In *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2016 IEEE/RSJ International Conference on.
- [18] Yüksel, B., Mahboubi, S., Secchi, C., Bühlhoff, H. H., & Franchi, A. (2015, May). Design, identification and experimental testing of a light-weight flexible-joint arm for aerial physical interaction. In *Robotics and Automation (ICRA)*, 2015 IEEE Int. Conf. on (pp. 870-876). IEEE.
- [19] Youtube: "AEROARMS - Entwicklung des ersten Flug-Roboters | Automatica 2016".

EVALUACIÓN DE UN ENTORNO DE TELEOPERACIÓN CON ROS

David Vargas Frutos (david.vargas@upm.es), Juan Carlos Ramos Martínez (juancarlos.ramos@upm.es), José Luis Samper Escudero (joseluis.samper@upm.es), Miguel A. Sánchez-Urán González (miguelangel.sanchezuran@upm.es), Manuel Ferre Pérez (manuel.ferre@upm.es)

Centro de Automática y Robótica (CAR) UPM-CSIC, Universidad Politécnica de Madrid.

Resumen

En este artículo se resume el desarrollo de un sistema de teleoperación para el Grips de Kraft Tele-Robotics. La integración con ROS permite el uso de varias herramientas de análisis de datos, visualización, simulación, e interacción con múltiples sensores. Como instrumento maestro del sistema se propone el dispositivo háptico Phantom Omni de SensAble, para el que se ha desarrollado una reflexión de fuerzas.

Palabras clave: Robótica, teleoperación, háptico, realimentación de fuerzas.

1. INTRODUCCIÓN

El hombre a lo largo de la historia ha utilizado herramientas para aumentar el alcance de su capacidad de manipulación. Esto desembocó en lo que se conoce como sistemas de teleoperación maestro-esclavo, en los que el manipulador esclavo reproduce con fidelidad los movimientos que se ejecutan en el dispositivo maestro [?].

Dentro de la teleoperación, el sistema de control más básico es el unilateral, en el que el maestro simplemente genera las señales de referencia, y sea en posición o en velocidad, y el esclavo reproduce esas señales. El control bilateral, por otro lado, es una evolución de éste, en el que se genera una realimentación de información, normalmente en forma de fuerza aplicada sobre la mano del operador. Un esquema de este tipo de sistema puede observarse en la Figura 1. Los problemas asociados a este tipo de control son los debidos a los retardos del esclavo, tanto en su movimiento, como en la realimentación de fuerzas que éste deberá generar.

La realimentación de información al operador se hace de diferentes formas. En primer lugar, de forma visual mediante el envío de imágenes de vídeo o simulaciones gráficas. El sentido de la vista permite conocer de qué elementos se compone la zona de trabajo, así como sus características de dimensión, posición, etc. Por otro lado, el sentido del tacto informa sobre los esfuerzos que se producen

en la manipulación de los objetos. Sistemas hápticos como el aquí descrito, ayudan a la inmersión en el entorno mediante una realimentación en fuerza. Por último, la realimentación auditiva no suele ser utilizada y se limita a sonidos de alarmas o a los producidos por las propias máquinas.

Cuando se diseña un sistema de teleoperación, una de las cosas que se debe tener en cuenta es el tipo de señales que se quieren transmitir entre el dispositivo maestro y el esclavo. Los dos esquemas de teleoperación bilateral más comunes son el esquema posición-posición y fuerza-posición [?]. El esquema de fuerza-posición, al igual que el de posición-posición, tiene un bucle cerrado de posición en el esclavo, tomando como referencia la posición en el maestro. Sin embargo, precisa de un sensor que sirva para obtener la fuerza/par que aplica el esclavo sobre su entorno o viceversa. Esta información es enviada al maestro y éste refleja esa lectura en bucle abierto de fuerza sobre el operador. Un amplio estudio sobre el control bilateral se realiza en [?], donde se analizan esquemas clásicos de control bilateral y esquemas con retardo temporal.

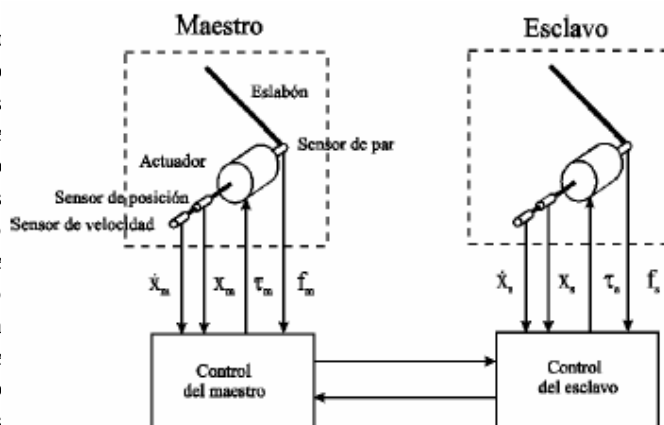


Figura 1: Esquema general de control bilateral. El maestro transmite al esclavo información acerca de distintos parámetros, como posición y velocidad. El esclavo realimenta al maestro con información que el operador percibe en forma de fuerzas.

También son posibles sistemas de control bilate-

ral en los que no existan sensores de fuerza. Para ello, es necesario realizar una estimación de los estados y fuerzas del sistema, y después usar estas estimaciones en los controladores. Un ejemplo de estos sistemas es desarrollado en [?]. En robots hidráulicos, como es este caso, puede ser calculada una aproximación del par de reacción que existe en cada articulación a partir de la diferencia de presión existente en los dos cilindros hidráulicos.

En relación a las interfaces de control, se puede hablar de interfaces directas, en las que el operador controla directamente el manipulador, o interfaces multimodales, que toman información de varios sensores, la combinan, y el operador la puede percibir a través de varios sentidos, lo que le permite un mejor control del manipulador. Por último, las interfaces para control supervisado incluyen todo tipo de dispositivos para aumentar el grado de inmersión en el entorno, dispositivos que pueden ser unas gafas de realidad virtual o un dispositivo háptico. El uso de estas interfaces crece cada vez más, y es en el aspecto háptico en lo que se centra este artículo.

El estudio aquí mostrado presenta la teleoperación de un brazo robótico de 6 grados de libertad mediante un dispositivo háptico de también 6 grados de libertad, con la posibilidad de realimentar al operador de forma proporcional a las fuerzas que actúen sobre el manipulador.

En la sección 2 se presentan algunas nociones sobre ROS y su uso en teleoperación. En la sección número 3 se procede a describir los equipos que conforman el entorno de teleoperación, en la sección número 4 se comentan aspectos sobre el tipo de las arquitecturas de teleoperación establecidas y sobre la realimentación de fuerzas generada en el dispositivo maestro, para finalmente, en la sección 5 concluir con un análisis de los resultados obtenidos.

2. ROS APLICADO A SISTEMAS TELEOPERADOS

2.1. ROS

ROS (Robotic Operating System) [?] es una plataforma de desarrollo *open source* para sistemas robóticos. Se compone por un conjunto de librerías, herramientas y estándares que ayudan al desarrollo de software robótico. Provee elementos tales como controladores y algoritmos, como por ejemplo algoritmos de navegación o de teleoperación. Es un sistema basado en un concepto modular y distribuido. Los distintos módulos se llaman nodos y se comunican entre sí mediante mensajes transmitidos a través de *topics* o servicios, si-

guiendo un modelo de publicador/suscriptor. Este modelo permite un envío de información ágil y dinámico.

2.2. ROS EN TELEOPERACIÓN

ROS tiene compatibilidad con un gran número de robots de forma nativa, al igual que con un gran número de sensores y cámaras. Para ello, proporciona varios paquetes que pueden facilitar tareas como la generación correcta de trayectorias, o planificación de agarres. También tiene integración con dos potentes herramientas de simulación y visualización como son Gazebo y RViz, lo que hace de ROS una plataforma muy completa para el desarrollo de tareas de teleoperación.

Los controladores utilizados para teleoperación deben estar diseñados de tal forma que sean robustos ante retardos, saturación en los actuadores y otras no linealidades. ROS es capaz de proporcionar el estado del maestro y del esclavo en cada ciclo de ejecución, además de monitorizar parámetros importantes del modelo. También permite calcular transformaciones de coordenadas, de forma que se puede obtener la posición en el espacio de cualquier componente referenciado a cualquiera de los sistemas de coordenadas definidos. Esto permite realizar una operación sobre el esclavo de forma instantánea a la que se realiza sobre el maestro. Además, el propio framework integra y gestiona eficazmente distintas interfaces con los principales protocolos de comunicación como CAN-BUS, TCP/IP y UDP.

3. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS

El sistema real en el que se realizan los experimentos está formado por los siguientes componentes:

- Telemanipulador hidráulico Grips de Kraft TeleRobotics.
- Controlador en tiempo real de ©National Instruments NI-PXIE-8108.
- PC corriendo Labview 2011 conectado con el PXI.
- Sensor de Fuerza/Par ATI SI-130-10.
- Dispositivo háptico Phantom Omni de SensAble.

3.1. TELEMANIPULADOR GRIPS DE KRAFT TELEROBOTICS

El brazo robótico utilizado es el modelo *Grips* del fabricante *Kraft TeleRobotics* mostrado en la Figura 2. Se trata de un manipulador hidráulico de

6 grados de libertad cuya operación se lleva a cabo bajo un sistema maestro-esclavo mediante el que se pueden realizar tareas con movimientos y velocidad humanos.

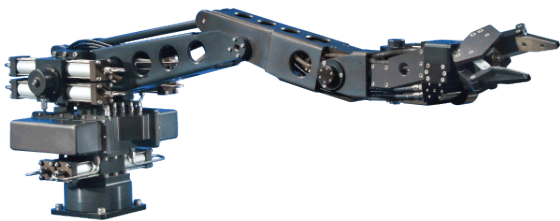


Figura 2: Brazo robótico hidráulico Grips de Kraft TeleRobotics utilizado como esclavo en el entorno de teleoperación bajo ROS.

Este sistema cuenta con la capacidad de reflejar las fuerzas que actúan sobre el brazo manipulador, de tal forma que el operador es realimentado con información de fuerzas y recibe así una mejor percepción del entorno de operación. Esta cualidad hace posible realizar tareas de un mayor grado de complejidad, como se ve en [?].

Como efectores finales se han usado dos pinzas diferentes. En primer lugar, una simple de dos dedos de *Kraft TeleRobotics*. Como segunda pinza, se usa una de tres dedos de *Robotiq*, que además dispone de sensores de fuerza en cada uno de los dedos. Las posibilidades de agarre de ésta última son variadas, ya que permite realizar agarre en tijera, con dos dedos, o adaptar los tres dedos a la forma del objeto a manipular. La decisión de usar como segunda pinza una de tres dedos es debido al equilibrio que tiene entre rendimiento y flexibilidad.

3.2. DISPOSITIVO HÁPTICO PHANTOM OMNI DE SENSABLE



Figura 3: Dispositivo háptico Phantom Omni de SensAble utilizado como maestro en el entorno de teleoperación bajo ROS.

Como recurso de control maestro se ha utilizado el *Phantom Omni* del fabricante *SensAble*, mostrado en la Figura 3.

Consiste en un dispositivo háptico de 6 grados de libertad, cuyas 3 primeras articulaciones son capaces de generar reflexión de fuerzas y que permite la interacción con entornos virtuales complejos. Puede medir de forma precisa la posición espacial tridimensional (X, Y, Z) y la orientación (giro, inclinación y dirección). Puede trabajar en ROS gracias al desarrollo de paquetes que hacen compatible su integración. En [?] se recoge un estudio sobre su análisis cinemático y manipulabilidad.

3.3. MODELO SIMULADO

Para el modelo simulado se ha utilizado Gazebo [?] como simulador debido a su potencia y a su facilidad de integración con ROS. Gracias al potente motor de físicas que posee Gazebo, se dispone de la capacidad de simular de forma precisa y totalmente realista el comportamiento de diversos entornos y escenarios bajo condiciones muy similares a la realidad. Debido a la complejidad de la puesta en marcha del sistema hidráulico del esclavo, así como a la peligrosidad de una operación imprecisa de un brazo robótico de tales dimensiones, el uso de Gazebo como base de testeo en simulación de los algoritmos desarrollados se torna fundamental.

Para dicha simulación se ha podido disponer de un modelo virtual del brazo robótico proporcionado por el fabricante. Se dispone también de los modelos de ambas pinzas facilitados igualmente por los fabricantes, con la necesidad de llevar a cabo la integración con el modelo global. Esto da lugar a un modelo virtual con un alto nivel de detalle y semejanza con el real. El modelo virtual utilizado se puede apreciar en la ilustración mostrada en la Figura 4.

Los modelos están formados por un conjunto de ficheros URDF. El acrónimo URDF proviene de *Unified Robot Description Format*, y es la forma que ROS tiene de representar modelos de robots. Lo que se hace generalmente es desglosar el modelo en ficheros XACRO primero, para después convertirlo a URDF. Cada fichero representa una parte del modelo general a través de un conjunto de *links* y de *joints*, por ejemplo el sensor de fuerza, o una de las pinzas.

Para las pruebas en simulación se ha diseñado un entorno similar al del laboratorio real, en el que se han añadido diferentes objetos para hacer pruebas de agarre, como son una esfera y un disco. Estos objetos servirán para comprobar las ventajas de cada una de las pinzas. La pinza de tres dedos, debido a su configuración, se adapta mejor

al agarre de la esfera, mientras que por otro lado, el disco es agarrado de forma más sencilla por el de dos dedos.

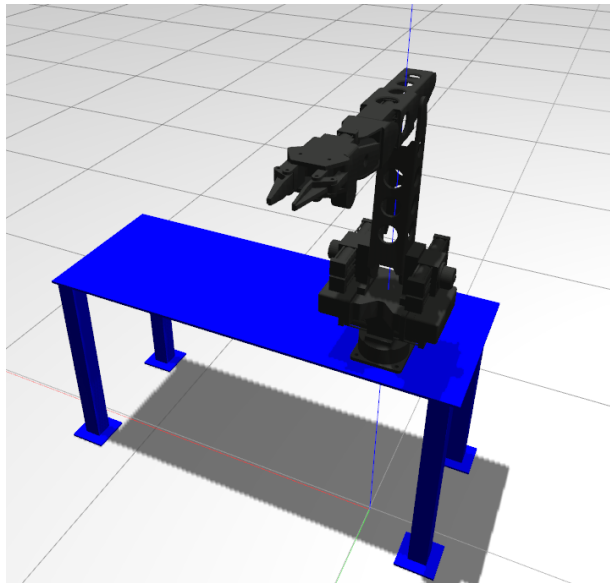


Figura 4: Simulación en Gazebo del entorno de manipulación. En el escenario real del laboratorio donde se ha llevado a cabo este trabajo, el brazo robótico Grips se encuentra situado sobre una estructura similar a una mesa, en la simulación se refleja fielmente dicha configuración.

En cuanto al dispositivo maestro, también se dispone de una interfaz gráfica para visualizar diferentes parámetros del mismo. Con los ficheros adecuados que especifican el modelo virtual del Phantom Omni, desde la herramienta RViz propia de ROS se puede monitorizar el dispositivo y la posición de cada una de sus articulaciones. Esto es útil para apreciar de una forma visual la información de posición y orientación de cada una de las articulaciones que se está transmitiendo por los *topics* correspondientes, en especial la referida al extremo final del dispositivo háptico. En la Figura 5 se puede apreciar la representación virtual del dispositivo háptico y el gizmo que indica de forma visual la posición y orientación de su extremo final.

4. ARQUITECTURAS DE TELEOPERACIÓN E INTERACCIÓN HÁPTICA

Uno de los factores que más influye a la hora de realizar este sistema teleoperado es el hecho de que el dispositivo háptico maestro no tiene la misma configuración cinemática que el brazo robótico esclavo, lo que hace necesario que se tenga que realizar una adaptación entre dispositivos.

Para ubicar el efector final del esclavo dentro del espacio de trabajo del brazo robótico en una posición semejante a la posición y orientación del efector final del maestro es necesario realizar una serie de transformaciones.

En cuanto a la posición, se realiza un proceso de escalado de las coordenadas cartesianas de la posición del efector final del esclavo aplicando un factor de conversión para cada eje. En este proceso de conversión se tienen en cuenta los alcances máximos de los efectores finales de maestro y esclavo en cada eje. Conociendo los límites de movimiento de cada caso se puede aplicar una conversión proporcional entre los distintos espacios de trabajo.

En cuanto a la rotación, se reformula la orientación de la ubicación del efector final del esclavo. Debido a que maestro y esclavo tienen configuraciones cinemáticas distintas, la posición natural o de reposo de ambos es distinta, y sus efectores finales tienen orientaciones respecto a sus sistemas de coordenadas locales prácticamente opuestas. La necesidad de realizar transformaciones entre las orientaciones de los efectores finales viene dada por la imposibilidad de alcanzar determinadas posiciones del esclavo manteniendo las orientaciones indicadas por el maestro.

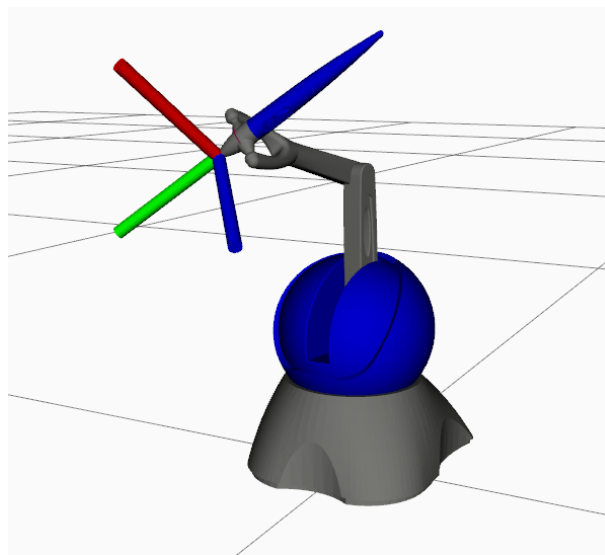


Figura 5: Modelo virtual del Phantom Omni

Con el objetivo de ubicar el efector final del esclavo en una posición determinada, se calcula la cinemática inversa del brazo robótico esclavo. Con los parámetros de la cinemática inversa es posible obtener la configuración angular de cada una de las articulaciones del brazo robótico para ubicar el efector final en tales posición y orientación.

En este punto cabe destacar que las posiciones que el esclavo es capaz de alcanzar tienen un determi-

nado número de orientaciones posibles. Por ello, si se indica al esclavo que se sitúe en una posición con una orientación que no es capaz de reproducir, los cálculos de cinemática inversa para esa posición en concreto devolverán un resultado negativo y se considerará que la posición pedida es inalcanzable. Como resultado, aunque las coordenadas cartesianas de la posición pedida al esclavo fueran posibles de alcanzar, si la orientación indicada no es la adecuada, el brazo robótico no se moverá a tal posición.

Una posible solución a este problema requiere realizar un cálculo exhaustivo de las rotaciones viables del efector final del esclavo para cada una de las incontables posiciones que el brazo robótico es capaz de alcanzar. Ante tal situación, se ha optado por una solución más inmediata, que consiste en relajar la tolerancia en términos de la orientación del efector final pedida al esclavo. De esta forma, se tendrán mayores probabilidades de que la cinemática inversa del brazo robótico pueda devolver resultados positivos para alcanzar la posición indicada por el maestro si se otorga menos prioridad a los requisitos de exactitud en la orientación.

Existen diversas librerías y métodos de cálculo de cinemáticas inversas [?]. Para este caso, se ha optado por calcular la cinemática inversa del esclavo usando la librería *TRAC-IK* [?]. Desarrollada recientemente, comprende un conjunto de paquetes integrados con ROS que proporcionan soluciones de cinemática inversa más eficientes que las calculadas por métodos habituales como KDL, basados en el cálculo de Jacobianas inversas. Tales algoritmos de convergencia aplican el método de Newton, que no siempre converge a una solución cuando se imponen límites articulares, algo común en muchas plataformas robóticas. *TRAC-IK* ejecuta de forma concurrente dos implementaciones de cinemática inversa. Una de ellas es una extensión del método de Newton que detecta y mitiga, mediante saltos aleatorios, los mínimos locales debido a los límites de las articulaciones. La otra consiste en un enfoque de optimización no lineal SQP (*Sequential Quadratic Programming*) que utiliza métodos cuasi-Newtonianos que manejan mejor los límites de las articulaciones. La búsqueda de la cinemática inversa devuelve una solución inmediatamente cuando uno de estos algoritmos converge.

En definitiva, esta implementación alternativa de cinemática inversa encuentra soluciones mucho más a menudo que KDL, es más rápida en promedio que KDL para cadenas de manipulación típicas y, si se desea, permite aplicar tolerancias en cada dimensión cartesiana, incrementando aún más la velocidad de convergencia. Por lo tanto, el uso de esta herramienta supone una solución perfecta pa-

ra el trabajo llevado a cabo.

Los procesos computacionales que se ejecutan son varios. Comprenden el cálculo de la posición y orientación del extremo del maestro en función del sistema de coordenadas definido como original; la adaptación de esta ubicación al espacio de trabajo del esclavo; el cálculo de la cinemática inversa con la que definir la configuración de las articulaciones del brazo robótico para alcanzar la ubicación pretendida y decidir si es viable o no; y el movimiento físico de las articulaciones a las posiciones decididas.

Todo este coste de procesamientos mencionados se ve reflejado en forma de retardos. La precisión no supone un problema por parte del maestro, pero el proceso de transformaciones que hay que realizar para generar coordenadas de ubicaciones adecuadas para el esclavo, así como los cálculos de cinemática inversa para llevar al esclavo a dichas ubicaciones, puede degradar esa precisión. Se han configurado distintas arquitecturas para experimentar el rendimiento de este sistema de teleoperación.

4.1. ARQUITECTURA CENTRALIZADA

La experimentación inicial consiste en realizar la teleoperación bajo una arquitectura centralizada, es decir, consiste en la ejecución de todo el software en un único ordenador. Tanto la adquisición de los datos de posiciones del maestro, la conversión a posiciones correspondientes en el espacio de trabajo del esclavo, el cálculo de las cinemáticas inversas, como el renderizado de la simulación del esclavo en el entorno virtual, se llevan a cabo en la misma máquina. El equipo utilizado para este experimento dispone de un procesador Intel Core i7-6700 a 3.40 GHz de frecuencia.

Los cálculos de cinemática inversa y el renderizado de la simulación son los procesos más costosos de todos los que se están llevando a cabo durante la ejecución de teleoperación. Ejecutando ambos en la misma máquina, se calcula el coste de cómputo de la cinemática inversa. El tiempo promedio de ejecución obtenido no supera los 5 milisegundos.

4.2. ARQUITECTURA DISTRIBUIDA

Se establece una arquitectura distribuida del sistema de teleoperación buscando una mayor fluidez de ejecución. En este caso se utilizan máquinas distintas para ejecutar la simulación por un lado y los cálculos de cinemática inversa y procesos de adquisición de datos por otro. Ambas máquinas pertenecen a la misma red de comunicaciones de área local. Se trabaja con el mismo ordenador uti-

lizado en el caso de la arquitectura centralizada, y se añade un ordenador portátil que dispone de un procesador Intel Core i7-7700HQ a 2.80 GHz de frecuencia

El hecho de que ROS esté basado en un funcionamiento distribuido hace sencillo la configuración de una arquitectura de este tipo. Es preciso definir convenientemente las variables de entorno *ROS_MASTER_URI* y *ROS_IP* en cada una de las máquinas de la arquitectura para posibilitar la comunicación entre ellas dentro de la red.

A pesar de separar bajo esta configuración los procesos de computación de la cinemática inversa y del renderizado de la simulación, el tiempo promedio del coste de cómputo de la cinemática inversa no varía de forma destacable respecto a la ejecución bajo arquitectura centralizada.

De esta forma, tanto para arquitectura centralizada como para distribuida la teleoperación se realiza de forma prácticamente similar. En ambos casos se efectúa de forma fluida. Tal y como se puede apreciar en la Figura 6, la coordenada *X* (indicadas en color rojo) e *Y* (indicadas en color verde) de las posiciones de los efectores finales del maestro (representadas como líneas continuas) y del esclavo (representadas como líneas discontinuas) se encuentran reescaladas en cada instante, de tal forma que la posición indicada por el maestro se transforma inmediatamente en una posición apropiada y acorde al espacio de trabajo del esclavo.

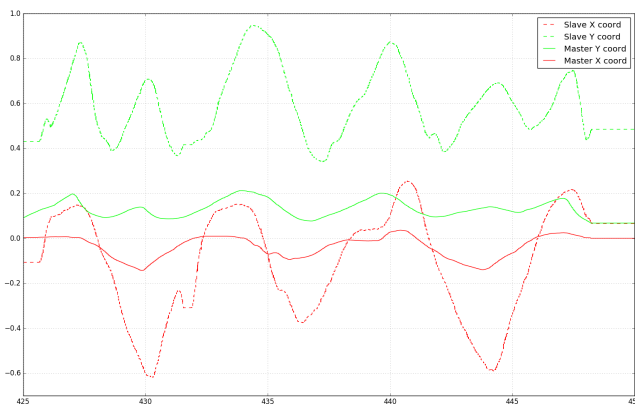


Figura 6: Gráfica de posicionamiento de los efectores finales de maestro y esclavo en un intervalo de 25 segundos. Se puede apreciar cómo cada ubicación del maestro es convertida de forma proporcional en una ubicación del esclavo. Los cálculos de cinemática inversa no introducen retardos apreciables en la operación del sistema maestro-esclavo, el esclavo se mueve de forma prácticamente inmediata a como lo hace el maestro.

4.3. ARQUITECTURA CON LÍNEAS DE TIEMPO REAL

Para realizar la teleoperación sobre hardware real y no sobre simulación se deben introducir elementos que proporcionen un funcionamiento en tiempo real. De esta forma, se sustituye el entorno virtual por el brazo robótico de *Kraft*, así como la comunicación mediante mensajes de ROS por un equipo de National Instruments orientado exclusivamente a trabajar bajo condiciones de tiempo real.

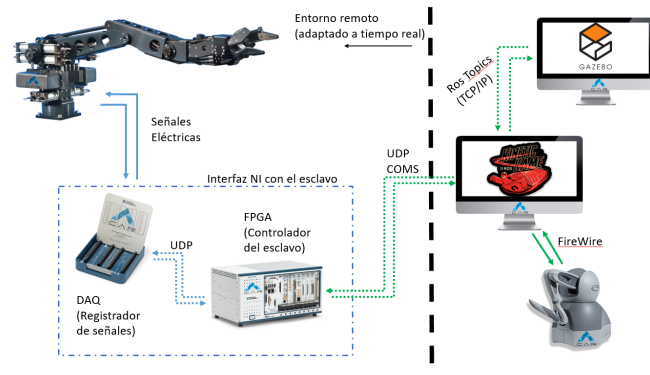


Figura 7: Arquitectura de teleoperación en tiempo real. Mientras la simulación del entorno virtual y la comunicación con el mismo se realiza bajo ROS, la operación del esclavo real requiere un equipamiento hardware adaptado a trabajar en tiempo real. En ambos casos, la adquisición de la información de las ubicaciones del efector final del maestro para realizar la tarea de control del esclavo se mantiene en ROS.

El sistema de teleoperación mencionado, mostrado en la Figura 7, funciona como prosigue: el programa que se ha desarrollado en ROS capta la posición final del *stylus* del *Phantom*, se calcula la cinemática inversa del esclavo para alcanzar la posición referida por el maestro, y el estado de cada una de las articulaciones que debería tener el *Kraft* se transmiten al PXI. Para este tipo de transmisión existen diversas soluciones, como es el caso del protocolo de comunicación BTP orientado a tareas de teleoperación desarrollado en [?]. Para este caso se utiliza UDP como protocolo de comunicaciones para transmitir las posiciones articulares. Por su parte, en el PXI está cargado un programa de *LabView* capaz de leer el estado de cada una de las articulaciones mandadas por UDP y enviárselas al *Kraft*, ejecutándose así el movimiento del esclavo.

El sistema de teleoperación queda totalmente completado con la reflexión al maestro u operador de las fuerzas ejecidas sobre el dispositivo esclavo mediante el entorno del manipulador.

4.4. REALIMENTACIÓN DE FUERZAS

La realimentación de fuerzas que se percibe en el dispositivo maestro permite detectar cuándo el brazo robótico colisiona o agarra un objeto, y cuándo actúan pares o fuerzas sobre sus articulaciones. Para la medición de los valores se dispone de un sensor de fuerza en el efector final del brazo robótico, al igual que de pequeños sensores en cada uno de los dedos de la pinza de *Robotiq*. Estos últimos valores de fuerza obtenidos al agarrar un objeto son enviados mediante terminal, al no disponer el dispositivo maestro de una interfaz sobre la que reproducirlos.

Como se recoge en [?], las fuerzas podrían ser estimadas partiendo de la ecuación que modela el comportamiento dinámico de un manipulador:

$$\tau_m = H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + \tau_g(q) + \tau_f(\dot{q}) + \tau_{ext} \quad (1)$$

Donde:

- τ_m es el vector de los torques ejercidos en cada articulación.
- $H(q)$ es la matriz de inercia del robot.
- $C(q, \dot{q})$ es el vector de fuerzas centrípetas y coriolis.
- τ_g es el vector de fuerzas de gravedad.
- τ_f es el vector de las fuerzas de fricción.
- τ_{ext} es el vector de torques externos aplicados en cada articulación.

Reordenando y entrando en juego la Jacobiana, se puede hacer una estimación de las fuerzas de la siguiente forma:

$$T_{ext} = J^T (\tau_m - H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + \tau_g(q) + \tau_f(\dot{q})) \quad (2)$$

donde J es la matriz jacobiana del robot. En cuanto al tiempo de muestreo, como se demuestra en [?], se tiene un valor de 1kHz, el recomendado para el tipo de teleoperación en la que es necesaria realimentación de fuerzas.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se ha logrado desarrollar una plataforma completa de teleoperación para el modelo *Grips* de *Kraft TeleRobotics* que permite simular el comportamiento de forma realista de todos los elementos. Gracias a esto, se puede ensayar antes de proceder con el robot real. Por otro lado, permite teleoperar de forma precisa, percibiendo además una realimentación de fuerzas a través del dispositivo háptico *Phantom Omni* de *SensAble*, lo que mejora el nivel de inmersión.

El software de ROS está orientado a funcionar como un sistema distribuido. Por este motivo, un entorno de nodos de ejecución con relativamente baja carga computacional que se ejecute en un equipo lo suficientemente moderno y potente no presenta diferencias de comportamiento entre ejecuciones bajo arquitectura centralizada y arquitectura distribuida.

A pesar de ello, a la hora de operar un esclavo hardware y no virtual, es recomendable prescindir de este framework, fundamentalmente porque está diseñado para funcionar bajo sistemas de Canonical y derivados, cuyos kernels no están comúnmente orientados a satisfacer los requisitos de tiempo real. Sustituir ROS por líneas de tiempo real configuradas mediante equipamiento orientado a trabajar en tiempo real permite establecer un entorno de teleoperación robótica con una adecuada reflexión de fuerzas.

En cuanto a los aspectos en los que seguir trabajando, una mejor realimentación de fuerzas es posible, al igual que una integración de todo el conjunto con un sistema de visión eficaz, por ejemplo formado por varias cámaras 3D como podrían ser los dispositivos *Kinect* de *Microsoft*.

Se propone también el desarrollo de un entorno bimanual en el que dos *kraft* pudieran colaborar para realizar tareas de manipulación más sofisticadas, como pudiera ser dar soporte con uno de ellos, y operar con el restante.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido patrocinado por la Universidad Politécnica de Madrid. El material ha sido proporcionado por el Centro de Automática y Robótica, centro mixto de la Universidad Politécnica de Madrid y del Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

El desarrollo de este trabajo ha sido parcialmente soportado por el proyecto ExoFlex (DPI2015-68842-R), financiado por MINECO.

Referencias

- [Ferre07] Ferre, M., Aracil, R., Balaguer, C., Buss, M., and Melchiorri, C. (Eds.). (2007). *Advances in telerobotics*, Heidelberg: Springer, Volume: 31.
- [Lawrence93] D.A. Lawrence, (1993) Stability and transparency in bilateral teleoperation, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Volume: 9, Issue: 5, Oct 1993.
- [Torres07] Bogado Torres, Juan Manuel, (2007) Control Bilateral de Robots Teleoperados

- por Convergencia de Estados, Tesis Doctoral Robótica e Informática Industrial, Universidad Politécnica de Madrid.
- [Daly09] John M. Daly, David W. L. Wang, (2009) Bilateral Teleoperation Using Unknown Input Observers for Force Estimation, *American Control Conference, ACC '09*.
- [Quigley09] M. Quigley, K. Conley, B. P. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, R. Wheeler, and A. Y. Ng., (2009) ROS: an open-source Robot Operating System. In *ICRA Workshop on Open Source Software*, 2009.
- [Qian14] Qian, W., Xia, Z., Xiong, J., Gan, Y., Guo, Y., Weng, S., and Zhang, J. (2014, December). Manipulation task simulation using ros and gazebo. In Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2014 *IEEE International Conference on* (pp. 2594-2598). IEEE.
- [Silva09] Alejandro Jarillo Silva, Omar A. Domínguez Ramírez, Vicente Parra Vega, Jesus P. Ordaz Oliver, (2009) PHANToM OMNI Haptic Device: Kinematic and Manipulability, *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, CERMA '09*.
- [Acero16] Enrique del Sol Acero, (2016) Force Estimation for Teleoperating Industrial Robots, *Automation and Control Trends*, Capítulo 3.
- [Dalvand14b] Mohsen Moradi Dalvand, Saeid Nahavandi, (2014) Improvements in teleoperation of industrial robots without low-level access, *Systems, Man and Cybernetics (SMC)*.
- [Beeson15] Beeson, P., and Ames, B. (2015, November). TRAC-IK: An open-source library for improved solving of generic inverse kinematics. In Humanoid Robots (Humanoids), 2015 *IEEE-RAS 15th International Conference on* (pp. 928-935). IEEE.
- [Wirz09] Raúl Wirz, Raul Marin, Manuel Ferre, Jorge Barrio, José M. Claver, and Javier Ortega, (2009) Bidirectional Transport Protocol for Teleoperated Robots, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume. 56, NO. 9, Sep 2009.
- [Díaz06] Iñaki Díaz, Josune Hernantes, Ignacio Mansa, Alberto Lozano, Diego Borro, Jorge Juan Gil, Emilio Sánchez, (2006) Influence of multisensory feedback on haptic accessibility tasks, *Virtual Reality*, Volume 10, Issue: 1, May 2006.
- [Robkani14] Nizar Rokbani, Alicia Casals, Adel M. Alimi, (2014) IK-FA, a New Heuristic Inverse Kinematics Solver Using Firefly Algorithm, *Computational Intelligence Applications in Modeling and Control*, on (pp 369-395).

GENERACIÓN DE CÓDIGO IEC 61131-3 A PARTIR DE DISEÑOS EN GRAFCET

M.L. Alvarez

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingeniería de Bilbao, UPV/EHU
marialuz.alvarez@ehu.eus

I. Sarachaga, A. Burgos, N. Iriondo, M. Marcos

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingeniería de Bilbao, UPV/EHU
isabel.sarachaga@ehu.eus, arantzazu.burgos@ehu.eus, nagore.iriondo@ehu.es
marga.marcos@ehu.eus

Resumen

Actualmente la colaboración entre aplicaciones es crucial en la ingeniería de automatización. En este trabajo se presenta un método de generación de código de control en texto estructurado de acuerdo con la norma IEC 61131-3 a partir de los GRAFCET de diseños obtenidos con la metodología MeiA, y generados con la herramienta que le da soporte. El prototipo desarrollado se ha utilizado en la generación del código correspondiente a un proceso de transferencia de piezas. A la reducción considerable del tiempo y de los errores de implementación de los programas de PLCs que proporciona este trabajo, hay que añadir la simplificación de las futuras tareas de mantenimiento.

Palabras Clave: GRAFCET, IEC 61131-3, ST, PLC.

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, la colaboración entre aplicaciones es crucial en la ingeniería de automatización. El diseño de los sistemas de control requiere la participación de un conjunto multidisciplinar de expertos, que precisan un entorno de diseño capaz de gestionar la colaboración interdisciplinar.

En los sistemas de automatización industrial el Controlador Lógico Programable (PLC) es la tecnología de control establecida. La asociación independiente de fabricante PLCopen se fundó en 1992 con la misión de resolver aspectos relacionados con la programación del control así como promover y dar soporte al uso de estándares en el área. IEC (International Electrotechnical Commission) promueve el uso de sistemas abiertos en el campo del control industrial. El estándar IEC 61131-3 [8] propone un modelo de software y lenguajes de programación textuales (ST - Structured Text, IL - Instruction List) y gráficos (LD - Ladder Diagram, FBD - Function

Block Diagram, SFC - Sequential Function Chart). De entre estos lenguajes de programación, el texto estructurado (ST) es el que mejor aborda la creciente complejidad de la programación de sistemas de control y ofrece mayor garantía de interoperabilidad entre herramientas de programación de PLCs [18].

En el diseño de sistemas de automatización, los lenguajes de modelado más utilizados son las Redes de Petri (RdP) [14],[13] y GRAFCET [9]. Numerosos trabajos y publicaciones han demostrado la utilidad práctica de las RdP en muchas áreas de aplicación [13], pese a que el estudio realizado en [7] concluye que las RdP son un lenguaje de modelado complejo. De hecho, el lenguaje de modelado GRAFCET se define sobre la base de las RdP acotándolas para representar eventos discretos secuenciales, además de proporcionar claridad y normalización a la representación gráfica. En este sentido, [4] realiza un estudio comparativo entre las RdP y SFC (Sequential Function Chart) concluyendo que GRAFCET y SFC se pueden ver como una Red de Petri de tipo binaria acotada, donde las transiciones se disparan de forma determinista.

La mayor aceptación de GRAFCET en el campo de la automatización es debida fundamentalmente a su intuitiva representación gráfica, sencillez y claridad para la representación de características como el paralelismo estructural [1].

En este trabajo se presenta un método de generación de código de control en texto estructurado de acuerdo con la norma IEC 61131-3 a partir de los GRAFCET de diseños obtenidos con la metodología MeiA, [1] y generados con la herramienta que le da soporte [2]. La metodología MeiA (MEthodology for Industrial Automation systems) ofrece guías de diseño y plantillas que capturan la experiencia de analistas y diseñadores, incluyendo no sólo aspectos estructurales claves, sino también aspectos relacionados con la flexibilidad, modularidad y extensibilidad de los diseños que pueden ser

reutilizados en otros sistemas. Siguiendo las fases y pasos de la metodología se obtienen los diseños en GRAFCET. La generación de código de control a partir del diseño obtenido con la herramienta reduce esfuerzo y tiempo de implementación.

La estructura del artículo es la siguiente: en el apartado 2 se realiza una revisión de trabajos relacionados con la generación de código de control. El apartado 3 presenta el método para la generación del proyecto de automatización, que se implementa en el prototipo descrito en el apartado 4. El apartado 5 ilustra la generación de código correspondiente al proceso “Transferencia de Piezas” utilizando el prototipo. Finalmente, las conclusiones se exponen en el apartado 6.

2 TRABAJOS RELACIONADOS

La colaboración entre aplicaciones, y más en concreto, la colaboración entre herramientas de diseño y programación que permitan la generación de software de control de manera automática reduce de forma considerable el tiempo de implementación de los programas de PLCs y produce una significativa reducción de los errores de implementación.

En la bibliografía se encuentran numerosas propuestas con este objetivo. Algunos enfoques utilizan Desarrollo Basado en Modelos (MDD) para la generación automática de código de control [20], [11]. Éstos presentan métodos y herramientas que son poco aceptadas en la programación práctica de PLCs en la industria.

Utilizando métodos y estándares más próximos al entorno industrial se presentan numerosos trabajos donde se utilizan las RdP para el diseño de sistemas de control, y diferentes algoritmos y métodos para la traducción a código fuente de PLC. En [6] los autores proponen un conjunto de técnicas de transformación de los diseños creados con RdP, denominadas IOPT, al lenguaje LD (Ladder Diagram). En [12] una herramienta implementa un método de transformación semiautomática de FIPN (Fuzzy Interpreted Petri Net) a texto estructurado (ST).

En los trabajos [17] y [10] se presenta la generación de código de PLCs partiendo de los diseños realizados en GRAFCET. En [17] seleccionan SFC como lenguaje de programación, pero requiere una normalización previa de los GRAFCETs antes de realizar las transformaciones debido a que SFC no permite representar las estructuras jerárquicas. En [10], los autores presentan una aproximación de transformación a lenguaje estructurado ST manteniendo las estructuras jerárquicas (macro-etapas y enclosed-grafcets) especificadas en

GRAFCET. Los autores seleccionan ST como lenguaje más adecuado para la transformación de los diseños en base a criterios de equivalencia semántica, legibilidad, portabilidad y facilidad de mantenimiento. La razón reside en que aún siendo SFC el lenguaje más cercano semánticamente a GRAFCET, GRAFCET sencillos pueden dar lugar a SFCs complejos al incluir jerarquía.

La generación del código de control que proporcionan estos trabajos reduce considerablemente el tiempo y los errores de implementación. El presente trabajo pretende, además, que el código generado tenga una estructura familiar para los programadores de PLCs, lo cual facilitará el mantenimiento del código.

3 GENERACIÓN DEL PROYECTO DE AUTOMATIZACIÓN

En los procesos de Diseño, la metodología *MeiA*, incorpora el lenguaje de modelado GRAFCET para generar las unidades de organización de diseño (DOUs - Design Organization Units). Se distinguen tres tipos de DOUs:

- DOUs de decisión que organizan el arranque y la parada de los distintos modos de funcionamiento, y coordinan todos los posibles estados del sistema.
- DOUs de producción que realizan las operaciones de producción, coordinación de operaciones, selección de parámetros de producción, etc.
- DOUs auxiliares que realizan procedimientos de inicialización, preparación, paros, avisos, etc.

La jerarquía, sincronización y coordinación de los GRAFCETs se realiza en base a señales de control generadas por los diferentes DOUs. No se utiliza la estructuración mediante macroetapas ni encapsulación. Además, dichos diseños cumplen las siguientes reglas:

- Toda etapa tiene un precedesor y un sucesor. Una etapa puede tener como precedesores: una transición o una divergencia en Y o una convergencia en O. Una etapa puede tener como sucesores: una transición o una convergencia en Y o una divergencia en O.
- Toda transición tiene un precedesor y un sucesor. Una transición puede tener como precedesores: una etapa o una convergencia en Y o una divergencia en O. Una transición puede tener como sucesores: una etapa o una divergencia en Y o una convergencia en O.
- Una divergencia en Y tiene como predecesor una transición y como sucesor tantas etapas como ramas en la divergencia.

- Una convergencia en Y tiene como predecesor tantas etapas como ramas confluyan y como sucesor una transición.
- Una divergencia en O tiene como predecesor una etapa y como sucesor tantas transiciones como ramas en la divergencia.
- Una convergencia en O tiene como predecesor tantas transiciones como ramas confluyan y como sucesor una etapa.

Partiendo de los diseños realizados en GRAFCET y desarrollados a nivel tecnológico, se generará la programación en la norma IEC 61131-3, distinguiendo: la **Parte Secuencial** que proporciona la secuencia de activación y desactivación de las distintas etapas y la **Parte Combinacional** que implementa las acciones del sistema en función de las etapas activas en cada momento. También se debe tener en cuenta la definición de todas las **Variables**.

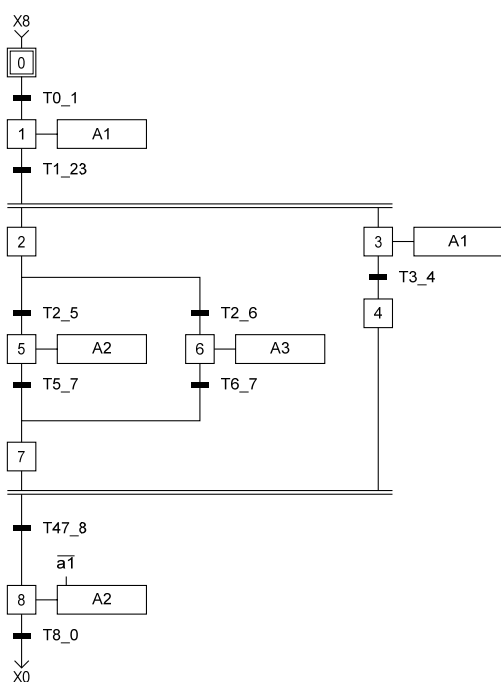


Figura 1: Ejemplo de GRAFCET (GEjemplo)

La Parte Secuencial se implementa con POU's de tipo bloque funcional; por cada DOU se genera un POU. Para ello, en primer lugar, se precisa construir la "Tabla de Set-Reset de las etapas" donde se presentan las condiciones que se deben cumplir para la activación y desactivación de cada etapa del GRAFCET. Una etapa se activa cuando está activada la etapa o etapas anteriores y se cumplen las condiciones de transición entre ambas. Cualquier etapa se desactiva cuando se cumplen las condiciones de transición a la-s siguiente-s etapa-s y dicha transición se haya efectuado (activadas etapas sucesoras).

Tabla 1: Tabla Set-Reset de las etapas

	Set (Activación de Etapas)	Reset (Desactivación de Etapas)
X0	$SX0 = X8 \cdot T8_0 + \text{Init}$	$RX0 = X1 + \text{Reset}$
X1	$SX1 = X0 \cdot T1_23$	$RX1 = X2 \cdot X3 + \text{Init} + \text{Reset}$
X2	$SX2 = X1 \cdot T1_23$	$RX2 = X5 + X6 + \text{Init} + \text{Reset}$
X3	$SX3 = X1 \cdot T1_23$	$RX3 = X4 + \text{Init} + \text{Reset}$
X4	$SX4 = X3 \cdot T3_4$	$RX4 = X8 + \text{Init} + \text{Reset}$
X5	$SX5 = X2 \cdot T2_5$	$RX5 = X7 + \text{Init} + \text{Reset}$
X6	$SX6 = X2 \cdot T2_6$	$RX6 = X7 + \text{Init} + \text{Reset}$
X7	$SX7 = X5 \cdot T5_7 + X6 \cdot T6_7$	$RX7 = X8 + \text{Init} + \text{Reset}$
X8	$SX8 = X4 \cdot X7 \cdot T47_8$	$RX8 = X0 + \text{Init} + \text{Reset}$

La Tabla 1 presenta la "Tabla Set-Reset de las etapas" para el GRAFCET (GEjemplo) de la Figura 1. Por ejemplo, la etapa 2 (X2) se activará cuando estando activa la etapa 1 (X1) se cumpla la condición asociada a la transición T1_23 y se desactivará cuando se active la etapa 5 (X5) o cuando se active la etapa 6 (X6) dependiendo de la evolución del GRAFCET. La variable **Init** se incluye con el fin de poder activar las etapas iniciales de los GRAFCETs y la variable **Reset** para desactivar todas las etapas. Dichas funcionalidades son requeridas para la puesta en el estado inicial de los GRAFCETs y para la implementación del paro de emergencia.

Para la programación, a cada etapa se le asocia una variable de estado **Xi** (donde i representa el número de etapa) de tipo booleana. Para cada etapa se programan dos estructuras de tipo IF-THEN: una para evaluar las condiciones que activan la etapa y otra para evaluar su desactivación.

(*---GEjemplo---*)

X0 : BOOL;
X1 : BOOL;
X2 : BOOL;
...

(* Set -Reset _____ X2*)

```
IF ( X1 AND T1_23 ) THEN
  X2:=1;
END_IF;
IF ( X5 OR X6 OR Init OR Reset ) THEN
  X2:=0;
END_IF;
```

Figura 2: Programación de la etapa 2 (X2) del ejemplo, resaltada en la tabla 1

Cada transición lleva una condición asociada denominada receptividad, siendo el resultado de la evaluación de la fórmula lógica de tipo booleano. Las receptividades en los DOUs tecnológicos se enuncian como expresiones lógicas que pueden ser traducidas directamente al lenguaje ST.

La **Parte Combinacional** se implementa en el POU principal de tipo Programa, en el cual se instanciará

cada uno de los POU's que implementan la parte secuencial.

Para la programación de las acciones se distinguen distintos tipos. Para la programación de cada una de las señales relacionadas con los actuadores del proceso (salidas) se realiza una búsqueda en las acciones de todos los GRAFCET con el fin de identificar todas las etapas en las que aparece, considerando si es una acción continua, si la acción es condicional o se trata de una asignación (set, reset o valor). Por ejemplo, la salida A2 del GEjemplo, se activará cuando esté activa la etapa 5 (X5) o cuando se active la etapa 8 (X8) si la señal a1 no está activada (1).

$$A2 := X5 \text{ OR } (X8 \text{ AND NOT } a1); \quad (1)$$

Las señales de control que coordinan y sincronizan los DOUs son programadas de la misma forma que las salidas.

Los contadores, temporizadores, pulsos, etc., se implementan instanciando los bloques funcionales que proporciona la norma IEC 61131-3. Las operaciones relacionadas con la inicialización y actualización de los mismos se programan de manera similar a las salidas.

4 PROTOTIPO

Uno de los editores de GRAFCET más extendido es SFCEdit © [19]. SFCEdit proporciona un interfaz gráfico para desarrollar diagramas GRAFCET 100% conforme a la norma IEC 60848 [9]. Por lo tanto, los diseñadores sólo necesitan centrarse en el contenido

y no en el léxico y la sintaxis de GRAFCET porque SFCEdit ofrece las directrices necesarias.

SFCEdit permite exportar GRAFCETs a los formatos XML, WMF y EMF. En el presente trabajo el archivo XML exportado es el punto de partida para la generación del código de control correspondiente en el lenguaje de programación ST de acuerdo a la norma IEC 61131-3.

Como marco de desarrollo, ha sido seleccionado el IDE de Eclipse [5]. Este entorno de desarrollo de código abierto y multiplataforma, proporciona un potente editor visual, un excelente motor de depuración y una interfaz gráfica de usuario flexible. Pero también es un sistema de plug-in extensible.

Aunque Eclipse soporta múltiples lenguajes, Java y XML se han utilizado para el desarrollo del prototipo, ya que Java proporciona código portable, mientras que XML proporciona datos portables. Como parser para documentos XML en Java se ha utilizado SAX(Simple API for XML) [16].

En los siguientes subapartados se presenta el esquema XML de SFCEdit y la generación del proyecto de automatización.

4.1 ESQUEMA XML DE SFCEDIT

El léxico y sintaxis de dicho fichero se presenta en la Figura 3. El elemento raíz es el proyecto (*project*). Cada proyecto está compuesto al menos por un GRAFCET (*grafcet*) caracterizado por un identificador, tipo (normal, macro o enclosure) y opcionalmente un comentario.

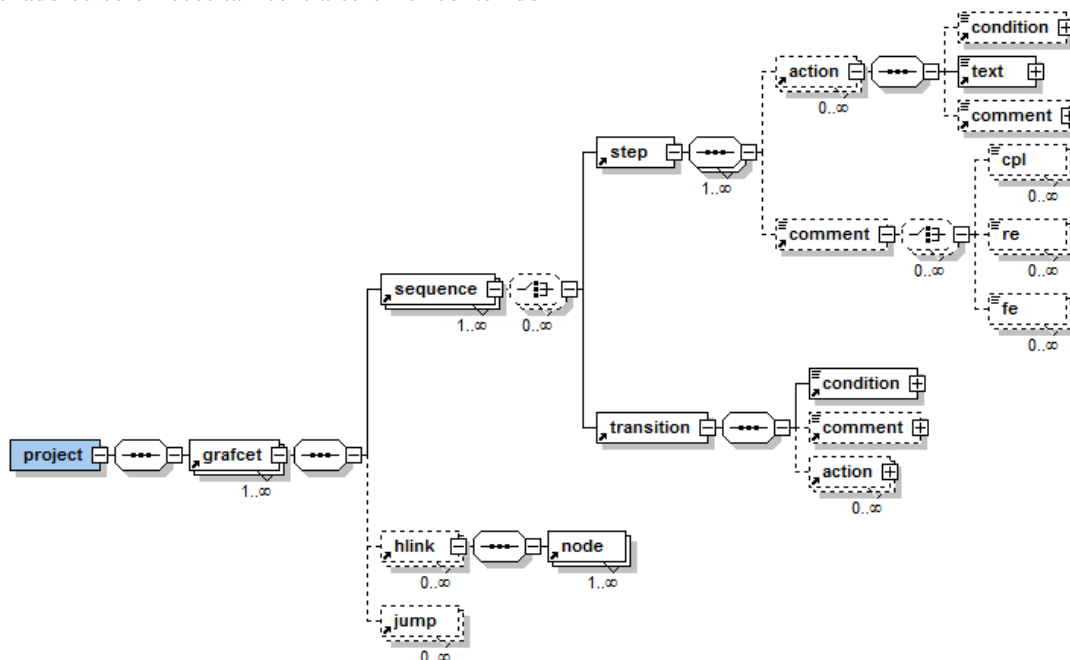


Figura 3: Léxico y sintaxis del editor SFCEdit

Un grafcet está formado por un conjunto de secuencias (*sequences*) y puede incluir enlaces horizontales (*hlink*) y saltos (*jump*) entre secuencias.

Normalmente las secuencias están formadas por un conjunto ordenado de pasos (*step*) y transiciones (*transition*). Un paso se caracteriza por su identificador, tipo (inicial, final, macro, task, enclosing o inicial enclosing), y opcionalmente un comentario (*comment*) y una lista de acciones (*action*). Las acciones incluyen el tipo (normal, a la activación, a la desactivación, condicional, forzado, por evento) dependiendo del modo y el instante en el que se deben ejecutar, la descripción textual (*text*), y opcionalmente comentarios (*comment*) y la condición (*condition*) en caso de tratarse de una acción condicional. Las transiciones deben tener obligatoriamente una condición (*condition*), y opcionalmente un comentario (*comment*) y una lista de acciones (*action*).

Los enlaces horizontales identifican la secuencia que enlazan mediante el atributo “seqid” y la lista de nodos (*node*) que al menos debe contener la identificación de dos secuencias “seqid”. Se pueden identificar cuatro tipos de enlaces horizontales: divergencia en Y (*div and*), divergencia en O (*div or*), convergencia en Y (*conv and*) y convergencia en O (*conv or*).

Los saltos deben identificar la secuencia origen “seqid_from” y la secuencia destino “seqid_to”.

```
<grafcet type="normal" owner="" name="GExample" comment="">
  <sequence id="1">
  </sequence>
  <sequence id="2">
    <step type="normal" name="X2" />
  </sequence>
  <sequence id="3">
  </sequence>
  <sequence id="4">
  </sequence>
  <sequence id="5">
  </sequence>
  <sequence id="6">
    <step type="normal" name="X7" />
  </sequence>
  <sequence id="7">
  </sequence>
  <hlink type="div and" seqid="1">
  </hlink>
  <hlink type="div or" seqid="2">
  </hlink>
  <hlink type="conv or" seqid="6">
  </hlink>
  <hlink type="conv and" seqid="7">
  </hlink>
  <jump seqid_from="7" seqid_to="1" />
</grafcet>
<grafcet type="normal" owner="" name="Grafcet" comment="">
</grafcet>
```

Figura 4: XML del GRAFCET GEjemplo

En la Figura 4 se presenta el fichero XML generado con SFCedit para el GRAFCET GEjemplo y en la Figura 5 se identifican gráficamente las distintas secuencias (en elipses), los tipos de enlaces

horizontales (DY, CY, DO y CO) con sus conexiones y el código XML correspondiente a una secuencia, un enlace horizontal (convergencia en Y) y un salto.

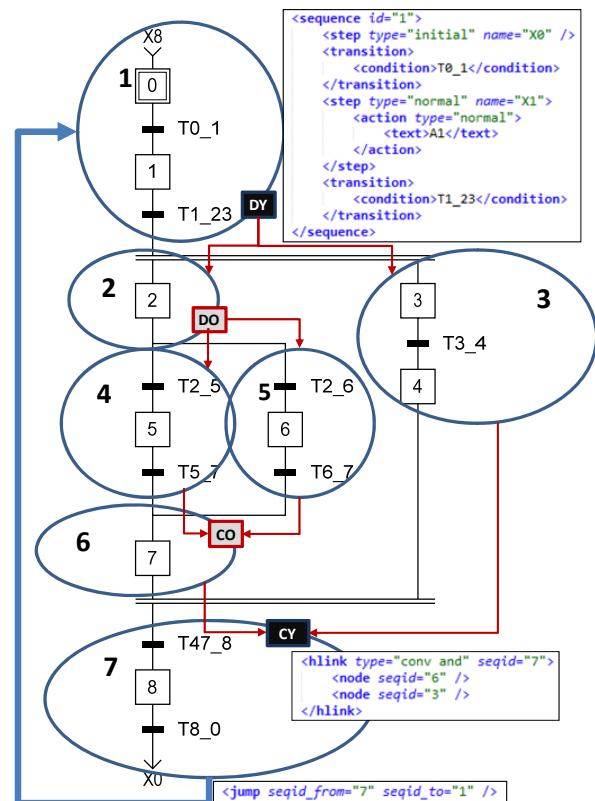


Figura 5: Relación entre el GRAFCET GEjemplo y los elementos definidos en el fichero XML

4.2 GENERACIÓN DE CÓDIGO

La generación del código de control comienza con la validación del fichero XML con el esquema ValidarGrafcet.xsd que presenta dos restricciones al esquema propuesto por SFCedit: (1) siempre va a existir al menos un salto, y (2) las transiciones no disponen de lista de acciones.

Partiendo del fichero validado se genera el proyecto de automatización, que consta de un conjunto de POU's (bloques funcionales) correspondientes a la parte secuencial, un POU principal (programa) de la parte combinatorial y la definición del conjunto de variables del proyecto.

En lo que respecta a la parte secuencial, en primer lugar hay que construir la “Tabla de Set-Reset de las etapas”.

La parte correspondiente al Set se realiza identificando los predecesores de cada etapa. Si la etapa es el primer elemento de una secuencia, el predecesor puede ser un enlace horizontal (divergencia en Y o convergencia en O) o un salto,

teniendo que buscar la-s transición-es y etapa-s en secuencia-s predecesora-s. Pero, si la etapa no es el primer elemento de la secuencia, la transición predecesora se encuentra en la propia secuencia y la-s etapa-s predecesora-s de esta transición se pueden encontrar en la propia secuencia o en secuencia-s predecesora-s.

La parte correspondiente al Reset se realiza identificando los sucesores de cada etapa. Si la etapa es el último elemento de una secuencia, el sucesor puede ser un enlace horizontal (convergencia en Y o divergencia en O) o un salto, teniendo que buscar la-s etapa-s en secuencia-s sucesora-s. Pero, si la etapa no es el último elemento de la secuencia, la-s etapa-s sucesora-s se encuentran en la propia secuencia o en secuencia-s sucesora-s.

Con la información recopilada se programa un bloque funcional por cada GRAFCET, que consta de la declaración de variables y un conjunto de sentencias IF-THEN que evalúan la activación y desactivación de cada una de las etapas.

En cuanto a la parte combinacional, el programa consta de un conjunto de variables, las instancias a cada uno de los POU's que implementan la parte secuencial y la programación de las acciones.

Para cada acción relacionada con las salidas se programa una única sentencia de asignación, en la cual figuran todas las etapas en las que aparece dicha acción (condicionada si es el caso) enlazadas por el operador OR.

Para las acciones relacionadas con contadores se programan la carga de los contadores y su actualización (incremento, decremento) identificando las etapas que suscitan dichas acciones. De la misma forma se tratan las acciones relacionadas con la carga y activación de los temporizadores.

En cuanto a las variables del proyecto, en primer lugar se realiza su identificación en el fichero XML: las variables de etapa (booleanas) son los identificadores de las mismas; las salidas, entradas y señales de control se identifican en las condiciones de las transiciones y en las acciones; las variables asociadas a los temporizadores, contadores, etc. se identifican teniendo en cuenta los prefijos específicos que se utilizan en su denominación.

Una vez identificadas, hay que definir las indicando el tipo de variable (entrada, salida, memoria, constante y sistema) y tipo de dato (bool, Word, doubleword, etc.). Del mismo modo es necesario indicar el tipo de contador (CTD, CTU o CTDU) y de temporizador (TON, TOF o TP). La Figura 6 muestra el interfaz para realizar la definición de variables.

Nombre de variable	Tipo de variable	Tipo de dato
Inicio	Memoria	BOOL
SolModoAuto	Memoria	BOOL
AutoMtan	Entrada	BOOL
SonCondini	Memoria	BOOL
FinCondini	Memoria	BOOL
ProdNorm	Memoria	BOOL
SolParoFC	Memoria	BOOL

Nombre de variable	Tipo de temporizador
Temp1	TON
Temp2	TON

Nombre de variable	Tipo de contador
ContPiezas	CTD
ContErrores	CTU

Figura 6: Interfaz de usuario para la definición de variables.

5 CASO DE ESTUDIO

El prototipo de la herramienta [15] se ha aplicado en la generación del código de todos los ejemplos que están disponibles en el curso abierto “MeiA. Metodología para ingeniería de Automatización. Nivel de Diseño” [3]. A modo de ejemplo se presenta la generación de código correspondiente al proceso “Transferencia de Piezas”.

Generación de Código

T

Iniciar programa

Instrucciones

Acerca del Traductor

Configuración del programa

Selecciona el fichero XML que deseas traducir:

C:\Users\Admin\Desktop\TransPiezas\Transferencia Piezas OCW.xml

Examinar

Selecciona la carpeta donde se guardará la salida:

C:\Users\Admin\Desktop\TransPiezas

Examinar

Lenguaje de salida:

☒ Structured Text (ST)

☐ Instruction List (IL)

☐ Sequential Function Chart (SFC)

☐ Ladder Diagram (LD)

☐ Function Block Diagram (FBD)

Compatibilidad con:

Seleccione uno:

PLC TSX Micro (PL7Pro)

PLC Simatic (TwinCAT)

PLC Open

Iniciar

Volver al Menu

Figura 7: Interfaz inicial del prototipo.

Tal y como se muestra en la Figura 7, la generación de código comienza con la selección del fichero XML, del directorio destino de los ficheros resultantes y el PLC destinatario. A continuación se realiza la definición de variables tal y como se muestra en la Figura 6.

A modo resumen, la Figura 8 presenta el DOU correspondiente a la Secuencia Principal, el fichero XML generado por SFCedit y la generación de código correspondiente que incluye el bloque funcional, el programa y la definición de variables para dicho DOU.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un método de generación del proyecto de automatización a partir de los GRAFCET de diseños desarrollados a nivel tecnológico, que se han obtenido con la metodología **MeiA**, y generado con la herramienta que le da soporte. Para validar el método se ha desarrollado un prototipo que genera un conjunto de POU's (bloques

funcionales) correspondientes a la parte secuencial, un POU principal (programa) de la parte combinacional y la definición del conjunto de variables del proyecto. El código de control se ha generado en texto estructurado de acuerdo con la norma IEC 61131-3.

La generación del código de control permite reducir de forma considerable el tiempo de implementación de los programas de PLCs y proporciona una significativa reducción de los errores de implementación. Además, los POU's generados presentan una estructura sencilla de entender por los programadores de PLCs, lo cual facilita las futuras tareas de mantenimiento.

El trabajo futuro contempla la ampliación del prototipo para poder generar código de control en los restantes lenguajes de programación de la norma IEC 61131-3. También se pretende utilizar el enfoque de la ingeniería basada en modelos para realizar un prototipo que pueda ser integrado en el entorno **MeiA**.

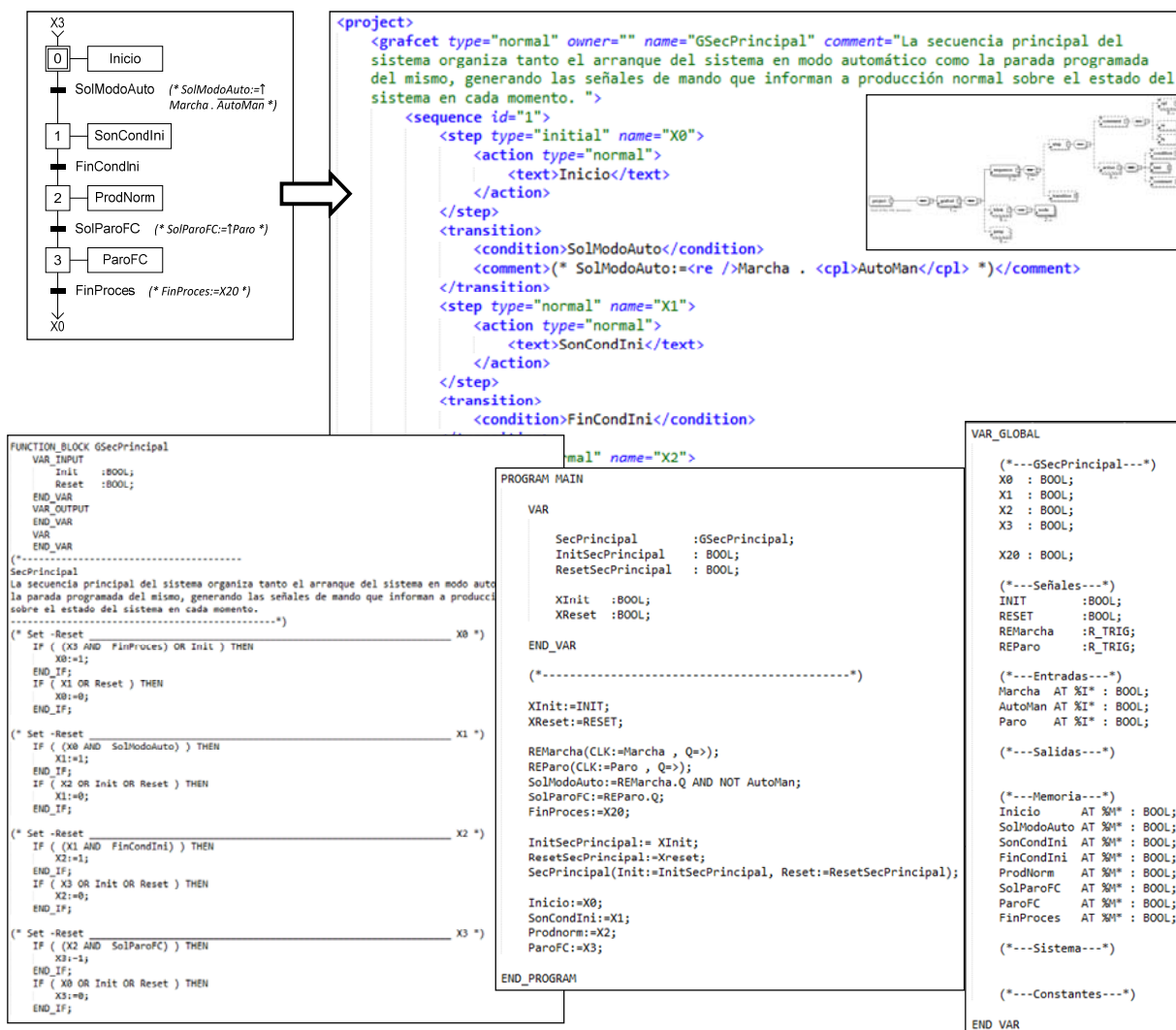


Figura 8: Generación de código del DOU Secuencia Principal del ejemplo Transferencia de Piezas

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto DPI2015-68602-R (MINECO/FEDER, UE), por la UPV/EHU en el marco del proyecto PPG17/56 y GV/EJ en el marco de grupos de investigación reconocidos IT914-16.

Referencias

- [1] Álvarez, M. L., Estévez, E., Sarachaga, M. I., Burgos, A., Marcos, M., (2013) A novel approach for supporting the development cycle of automation systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68, pp 711-725.
- [2] Álvarez, M. L., Sarachaga, I., Burgos, A., Estévez, E., Marcos, M., (2016) A Methodological approach to model-driven design and development of Automation Systems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, pp. 1-13.
- [3] Álvarez, M.L., Burgos, A., Sainz de Murieta, J.A., Sarachaga, M.I., (2017) Curso OCW: **MeiA**. Metodología para ingeniería de Automatización. Nivel de Diseño. <https://ocw.ehu.eus/course/view.php?id=415>
- [4] David, R., (1995) Grafcet: A powerful tool for specification of logic controllers. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 3 (3), pp. 253-2.
- [5] Eclipse. (2003) Eclipse IDE. Retrieved from <http://www.eclipse.org/>
- [6] Feio, R., (2017) Translating IOPT Petri net models into PLC ladder diagrams.. *Industrial Technology (ICIT)*, IEEE International Conference
- [7] González, V. M., Mateos, F., & Ng, A. (2004). MLAV: the Object-oriented Methodology of the Virtual Automation Lab. in *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5153-5158.
- [8] IEC, (2003) IEC 61131-3 Programmable Controllers — Part 3: Programming languages, *International Standard Edition 3.0*.
- [9] IEC 60848, (2013) International Electrotechnical Commission - GRAFCET specification language for sequential function charts.
- [10] Julius, R., Schürenberg, M., Schumacher, F., Fay, A., (2017) Transformation of GRAFCET to PLC code including hierarchical structures. *Control Engineering Practice*.vol 64, pp. 173-194.
- [11] Lukman, T., Godena, G., Gray, J., Hericko, M., Strmcnik, S., (2013) Model-driven engineering of process control software – beyond device-centric abstractions *Control Engineering Practice*, 21 (8), pp. 1078–1096.
- [12] Markiewicz, M., Surdej, L., Gniewek, L., (2016) Transformation of a fuzzy interpreted Petri net diagram into structured text code. *21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*,
- [13] Murillo, L., (2008) Redes de Petri: Modelado e implementación de algoritmos para autómatas programables. *Tecnología en Marcha*, 21 (4), pp. 102-125.
- [14] Panjaitan, S., (2010) A Formal Design of Automation Systems based on Operation Modes using High-level Petri Net. *Second International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies* , pp. 129-131.
- [15] Paz, H., (2016) Prototipo de la Herramienta de generación de código. <https://github.com/HPaz001/translator>
- [16] SAX (Simple API for XML). <http://www.saxproject.org/>.
- [17] Schumacher, F., Fay, A., (2014) Formal representation of GRAFCET to automatically generate control code *Control Engineering Practice*, 33, pp.84–93.
- [19] SFCEdit, (2010) Ingénierie en automatisme et informatique industrielle
- [20] Thramboulidis, K., Frey, G., (2011) Towards a model-driven IEC 61131-based development process in industrial automation *Journal of Software Engineering and Applications*, 4 (4), pp. 217–226.

CONTROL EN TIEMPO REAL Y SUPERVISIÓN DE PROCESOS MEDIANTE SERVIDORES OPC-UA

Francisco Blanes Noguera

pblanes@ai2.upv.es

Andrés Benlloch Faus

anbenfau@ai2.upv.es

Instituto Universitario de Automática e Informática Industrial

Universitat Politècnica de Valencia

Resumen

El control de procesos junto con la supervisión de los mismos son casos de sistemas con restricciones temporales de carácter diferente. Mientras el control requiere el cumplimiento de restricciones de forma estricta habitualmente, la supervisión permite un tratamiento más relajado de las condiciones. Esta naturaleza tan distinta de la problemática, hace que su combinación en el mismo sistema hardware sea compleja. [1]

El presente experimento aborda la problemática de controlar y supervisar el estado de una planta piloto con un elemento de posicionamiento crítico en su control. Para ello se han experimentado con diversas soluciones HW-SW valorando sus ventajas e inconvenientes.

Palabras Clave: sistema empotrado, control en tiempo real, supervisión de procesos, protocolo OPC-UA

1 INTRODUCCIÓN

El presente experimento tiene como objetivo llevar a cabo el control de un sistema de posicionamiento tridimensional crítico encargado de la recolección y posterior ubicación de piezas a lo largo de una cinta transportadora. Dicho control se deberá llevar a cabo de forma rápida y precisa, ya que la más mínima variación en la posición en cualquiera de los tres ejes de la grúa provocará una mala operación de la línea.

La planta piloto que vamos a controlar durante el experimento consta de una grúa compuesta de un sistema de succión formado por un compresor y unas válvulas de vacío, este sistema es el encargado de llevar a cabo el agarre de las piezas durante el proceso de transporte, 6 encoders encargados de contabilizar los pasos de los motores así como indicar la orientación del giro y 3 motores encargados de llevar a cabo el posicionamiento de la grúa. Los motores permiten llevar a cabo movimientos en el eje vertical, el eje horizontal y rotaciones horarias y anti horarias.

En una primera instancia se planteó llevar a cabo el control del proceso de posicionamiento de la grúa a través de las entradas y salidas digitales de un PLC, sin embargo, nos encontramos con la problemática de que la frecuencia de muestreo de las entradas digitales del PLC era mucho menor que la frecuencia a la que los encoders enviaban sus pulsos, el desfase existente entre las frecuencias provocaba la pérdida de pasos de los encoders, lo que se traducía en un posicionamiento erróneo de la grúa.

Dado que la frecuencia de muestreo del módulo entradas digitales del PLC no se podía aumentar, se optó reducir la frecuencia de los pulsos que enviaba el encoder al PLC, para ello se diseñó un sistema de división de pulsos virtual mediante un sistema empotrado programable, concretamente un Arduino Mega 2560, que permitía, gracias a la frecuencia de su reloj, muestrear todos los pulsos enviados por los encoders, contabilizarlos y enviar pulsos a las entradas digitales del PLC dentro de una frecuencia de muestreo válida para que el PLC fuese capaz de detectar las señales recibidas y poder llevar a cabo un posicionamiento correcto de la grúa. Esta solución resultó válida, sin embargo, no era óptima, ya que al dividir los pulsos del encoder perdíamos precisión en el posicionamiento, lo que producía que en ocasiones fuésemos incapaces de colocar la grúa en las posiciones apropiadas.

Para solucionar esta problemática se decidió cambiar el PLC encargado de controlar el proceso de posicionamiento de la grúa y el divisor de pulsos virtual por un sistema empotrado NI myRIO capaz de muestrear correctamente los pasos de los encoders y manejar la grúa, permitiéndonos aplicar un sistema de control en tiempo real válido sobre la misma. Esta solución resultó ser la más apropiada para aplicar un control sobre el proceso, ya que permitía posicionar de forma precisa la grúa, considerando únicamente el error proveniente de los problemas mecánicos existentes.

1.1 Motivación

En anteriores experimentos, no relacionados directamente con el que actualmente abordamos, se

llevaron a cabo pruebas con los sistemas industriales utilizados, y se determinó que las entradas digitales del PLC, al no tratarse de entradas de alta velocidad, eran incapaces de detectar todos los pulsos enviados por los encoders de la grúa, lo que dificultaba el posicionamiento de la grúa, provocando fallos en el funcionamiento del proceso industrial que estábamos simulando.

Para solucionar dicha problemática, y ser capaces de llevar a cabo un control eficiente y preciso de la grúa, se decidió implementar dos posibles soluciones, la primera de ellas consiste en llevar a cabo el diseño y desarrollo de un divisor de pulsos virtual mediante un sistema empujado programable Arduino Mega 2560. Este sistema será el encargado de llevar a cabo la cuenta de los pulsos de los tres encoders de la grúa y reducir su frecuencia para que las entradas digitales del PLC sean capaces de monitorizar los pasos del encoder.

La segunda solución, consisten en llevar a cabo la implementación del sistema de control sobre un sistema empujado NI myRIO, el cual, gracias a sus prestaciones, nos permite llevar a cabo la monitorización de las salidas digitales de la grúa sin perder ningún pulso y a su vez llevar a cabo el manejo de la misma a través de sus entradas, permitiéndonos así implementar un sistema de control capaz de posicionar de forma precisa la grúa sin necesidad de utilizar sistemas de apoyo.

1.2 Objetivos

Los objetivos que se pretenden alcanzar al finalizar el desarrollo de este trabajo son:

1. Evaluar las características de las soluciones planteadas, desde el punto de vista de sistemas de control en tiempo real.
2. Diseñar e implementar un divisor de pulsos virtual, que permita a las entradas digitales del PLC muestrear los pulsos enviados por los encoders de la grúa y así poder posicionar de la forma más precisa posible cada uno de los tres ejes.
3. Diseñar e implementar un sistema de control sobre un sistema empujado NI myRIO que nos permita monitorizar los encoders de la grúa y posicionarla de forma precisa. Esta implementación busca demostrar que un sistema empujado de estas características es capaz de llevar a cabo un control en tiempo real de un sistema industrial crítico.
4. Desplegar un servidor OPC-UA sobre un sistema empujado NI myRIO, con el objetivo de combinar en el mismo HW control en tiempo real y servicios de supervisión de alto nivel mediante protocolo OPC-UA.

5. Llevar a cabo la interconexión de diversos sistemas OPC-UA y monitorizar la grúa desde diferentes equipos.

2 EQUIPOS

Para llevar a cabo el control y posicionamiento de la grúa ha sido necesario utilizar diversos sistemas de control que permitiesen manejarla de forma precisa. Los elementos hardware utilizados en el experimento fueron:

2.1 PLC OMRON serie NJ

El PLC utilizado en los casos de uso del presente experimento es el modelo OMRON de la familia NJ1. Estos equipos son los utilizados a nivel industrial para llevar a cabo el control de procesos en tiempo real. Dichos sistemas disponen de módulos para añadir funcionalidad a la CPU, la cual se encarga de monitorizarlos y controlarlos. En el presente experimento, dado que las entradas y salidas del proceso a controlar son digitales se optó por la colocación de un módulo de entradas/salidas digitales que permitiese comunicar el PLC con el proceso y llevara a cabo el control del mismo.

2.1.1 Módulo E/S digitales MD232

El módulo de entradas/salidas digitales utilizado para llevar a cabo la comunicación entre el PLC y el proceso a controlar es el modelo MD232, dispone de un total de 16 entradas digitales y 16 salidas digitales, las cuales resultan suficientes para llevar a cabo el control del proceso de posicionamiento de la grúa.

2.2 Arduino Mega

El Arduino Mega es una placa basada en el microcontrolador ATmega2560 de Atmel que dispone de 54 pines I/O digitales, de los cuales 15 pueden utilizarse a su vez de salidas PWM, 16 entradas analógicas, 4 UARTs un reloj de 16 Mhz de frecuencia [3].

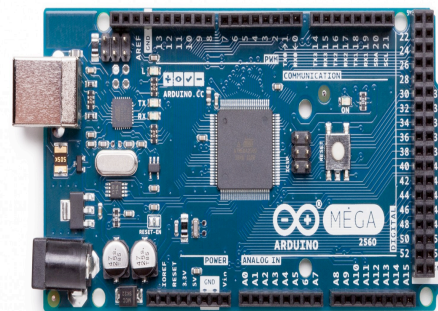


Figura 1: Arduino MEGA 2560.

Gracias a sus pines programables y a la frecuencia de reloj de 16 Mhz se convierte en un sistema válido para implementar un divisor de pulsos apropiado para el caso que nos ocupa. Se decidió utilizar un sistema programable para llevar a cabo la implementación del divisor de pulsos, y no el diseño de un sistema electrónico, para poder ajustar de forma dinámica y simple la frecuencia de división de la señal de los encoders.

2.3 NI myRIO

Se trata de un sistema educativo de tiempo real basado en la arquitectura ARM Cortex-A9 dual-core con entradas/salidas programables de FPGA Xilinx. El sistema empujado está formado por 10 salidas analógicas, 6 salidas digitales y 40 líneas de E/S digital. Además, dispone de conectividad alámbrica e inalámbrica lo que facilita su instalación en medios industriales [2].



Figura 2: NI myRIO.

En el experimento que nos ocupa el sistema empujado se programó para llevar a cabo tanto para la adquisición de datos como para la generación de señales de control.

3 DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

La problemática que nos ocupa en el presente experimento surgió tras intentar llevar a cabo el control de un proceso de posicionamiento preciso mediante un módulo de entradas/salidas digitales sin entradas rápidas de un PLC. Tras varias pruebas determinamos que el módulo era incapaz de detectar gran parte de los pulsos enviados por los encoders del proceso, provocando así errores en el posicionamiento de la grúa.

Dicha problemática motivó el diseño de un sistema de división de pulsos virtual con el objetivo de reducir la frecuencia de los pulsos que llegan al módulo de entradas digitales del PLC y permitir a este detectar los pasos de los encoders de posicionamiento de la grúa. El sistema de división de pulsos virtual está formado por un sistema empujado

Arduino Mega 2560 y tres relés, a través de los cuales el sistema empujado envía las señales de pulso de los encoders dividida a las entradas digitales del PLC.

Esta solución atenuó de forma considerable el error de posicionamiento existente cuando conectábamos directamente las salidas de los encoders a las entradas digitales del PLC, sin embargo, seguía existiendo un pequeño error en el posicionamiento de la grúa que producía que en ocasiones el funcionamiento de la grúa no fuese el correcto produciendo fallos en el proceso. Por este motivo, dado que el posicionamiento de la grúa resulta crítico para realizar correctamente las labores de ubicación de piezas, se decidió abordar una segunda solución para atenuar aún más el error de posicionamiento existente cuando utilizamos el divisor de pulsos virtual.

Esta segunda solución consiste en la utilización de un sistema empujado myRIO de National Instruments para llevar a cabo el control de la grúa en lugar de un PLC vinculado a un divisor de pulsos virtual. Gracias a las prestaciones que proporciona dicho sistema empujado, en esta ocasión las salidas digitales de los encoders pueden conectarse directamente a las entradas digitales del sistema de control sin miedo a perder ningún pulso de cualquiera de sus tres ejes de acción. Además, gracias a sus salidas digitales nos permite actuar directamente sobre las entradas de la grúa, permitiéndonos controlar el proceso de producción directamente desde el sistema empujado.

3.1 Divisor de pulsos virtual con Arduino Mega 2560

La finalidad del divisor de pulsos virtual es la de reducir N veces la frecuencia de las señales que envían los tres encoders de posicionamiento de la grúa para que la frecuencia de muestreo de las entradas digitales del módulo de entradas/salidas del PLC sea capaz de detectar cambios de estados y contabilizar los pulsos del encoder.

Para ello el divisor de pulsos virtual consta de un sistema empujado Arduino Mega 2560 programable, con una frecuencia de reloj de 16 Mhz capaz de detectar los pulsos que envía cada uno de los encoders a través de sus entradas digitales y tres relés que enviaran pulsos a las entradas digitales del PLC simulando los pulsos de los encoders.

Para ello se programaron tres contadores dentro del sistema empujado vinculados a las señales de los encoders y a las salidas que activan los relés. De esta forma cada vez que el sistema empujado contabilizaba un número determinado de pulsos por cada uno de los encoders de la grúa enviaba un pulso al PLC mediante la activación y posterior desactivación de los relés.

Sin embargo, este sistema presenta un inconveniente importante a tener en cuenta a la hora de posicionar

la grúa y es que para que las entradas digitales del PLC sean capaces de muestrear el paso del encoder es necesario dividir la señal del encoder en un orden de entre 8 y 10 veces, lo que provoca que se pierda precisión durante el posicionamiento de la grúa.

3.2 Control del proceso de posicionamiento de una grúa mediante NI myRIO

Debido a los errores de posicionamiento detectados cuando llevábamos a cabo el control de la grúa mediante el PLC, decidimos llevar a cabo la implementación de un sistema de control dentro de un sistema de tiempo real como es NI myRIO.

Al disponer dicho sistema de entradas y salidas digitales somos capaces de monitorizar todas las señales que envía la grúa sin necesidad de utilizar para ello divisores de pulsos, así como manejar esta mediante las salidas digitales del sistema empotrado. Para llevar a cabo el control del proceso de posicionamiento de la grúa se implementó una máquina de estados que simulase el comportamiento del graficet implementado en el PLC y así replicar el mismo sistema de control en ambos casos y poder realizar comparaciones entre ellos a posteriori.

4 EVALUACIÓN Y CASOS DE USO

Para testear que los sistemas que se ha implementado cumplía con los objetivos establecidos, se tomó la decisión de diseñar una serie de casos de uso que se describen con detalle en las siguientes subsecciones. Durante los diferentes casos de uso se utilizó un PLC Omron serie NJ, un sistema empotrado Arduino Mega, un sistema emportado NI myRIO y una maqueta Fishertechnik modelo “Vacuum Gripper Robot 24V” como la de la Figura 3.

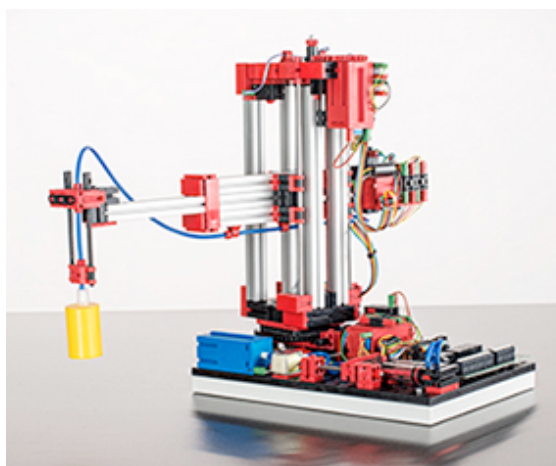


Figura 3: Maqueta Fishertechnik

4.1 Control de un proceso de posicionamiento crítico mediante PLC

El objetivo que se busca conseguir en este caso de uso es demostrar que el módulo de entradas/salidas digitales del PLC es incapaz de muestrear de forma correcta los pulsos enviados por los 3 encoders (Rotación, Avance/Retroceso y Subida/Bajada) de los que dispone la grúa para su posicionamiento.

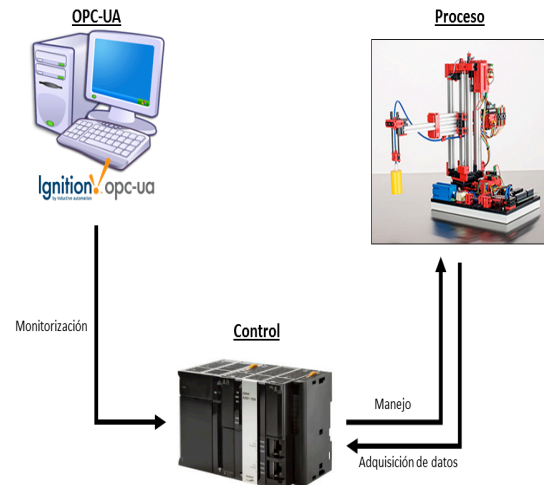


Figura 4: Esquema de la solución control mediante PLC.

1. Configuramos las entradas y salidas digitales del módulo MD232 en el PLC.
2. Conectamos las entradas y salidas digitales del PLC a las entradas y salidas digitales del proceso a controlar.
3. Cargamos en el PLC el programa graficet diseñado para controlar el proceso.
4. Ponemos en marcha el proceso en repetidas ocasiones y medimos las posiciones de la grúa para detectar los errores que se producen en el posicionamiento de la misma a causa de la baja frecuencia de muestreo de las entradas digitales del PLC.

4.2 Control de un proceso de posicionamiento crítico mediante PLC y divisor de pulsos virtual

Dado que en el caso de uso anterior demostramos que únicamente con la frecuencia de muestreo de las entradas y salidas digitales del PLC somos incapaces de detectar todos los pasos de los encoders, en este caso de uso se añade un divisor de pulsos entre el proceso y las entradas digitales del PLC para adecuar las señales enviadas a la frecuencia de muestreo del PLC, y así llegar a controlar de forma más eficiente el posicionamiento de la grúa.

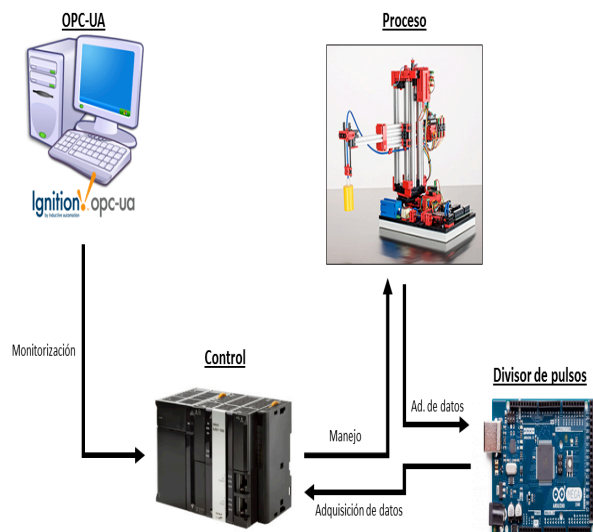


Figura 5: Esquema de la solución control mediante PLC y divisor de pulsos.

1. Configuramos las entradas y salidas digitales del módulo MD232 en el PLC.
2. Conectamos las salidas digitales del PLC a las entradas digitales del proceso.
3. Conectamos las salidas digitales del proceso al divisor de pulsos virtual implementado.
4. Conectamos las salidas del divisor de pulsos virtual a las entradas digitales del PLC.
5. Cargamos en el PLC el programa grafset diseñado para controlar el proceso.
6. Ponemos en marcha el proceso en repetidas ocasiones y medimos las posiciones de la grúa para detectar los errores que se producen en el posicionamiento de la misma.

Tras haber desplegado todo el sistema antes descrito, procedemos a comprobar si somos capaces de actuar sobre el proceso industrial sin errores de posicionamiento como si ocurría en el caso de uso anterior.

4.3 Control de un proceso de posicionamiento crítico mediante un sistema empotrado NI myRIO

Dado que en el caso de uso anterior se consiguió demostrar que mediante la utilización de un divisor de pulsos éramos capaces de muestrear de forma correcta los pasos del encoder pero, sin embargo, debido la división de pulsos perdíamos precisión en el posicionamiento de la grúa, en este caso de uso se opta por implementar el control del proceso dentro de un sistema empotrado NI myRIO, que gracias a sus características permite muestrear los pasos de los encoders sin necesidad de utilizar para ello un divisor

de pulsos, y además, gracias a sus salidas digitales manejar el proceso.

1. Configuramos las entradas y salidas digitales del sistema empotrado NI myRIO.
2. Implementamos una máquina de estados dentro del sistema empotrado para simular el grafset implementado en el PLC.
3. Conectamos las entradas y salidas digitales del proceso a las entradas y salidas digitales de NI myRIO.
4. Ponemos en marcha el proceso en repetidas ocasiones y medimos las posiciones de la grúa para detectar los errores que se producen en el posicionamiento de la misma.

En este caso de uso, dado que la frecuencia de muestreo de NI myRIO sí permite detectar todos los pasos de los encoders, y además tenemos el control del proceso en el mismo equipo, somos capaces de actuar en tiempo real sobre el proceso y llevar a cabo un posicionamiento más preciso que en los anteriores casos de uso.

4.4 Despliegue de un servidor OPC-UA sobre un sistema empotrado NI myRIO

Dado que la funcionalidad del presente experimento está orientada al control de un proceso industrial, y que actualmente a nivel industrial se está abogando cada vez más por la conectividad entre equipos y dispositivos desplegados a lo largo de una fábrica, decidimos desplegar un servidor OPC-UA que permitiese a cualquier cliente o servidor conectarse al sistema empotrado NI myRIO y acceder a los datos que en él se almacenan [4].

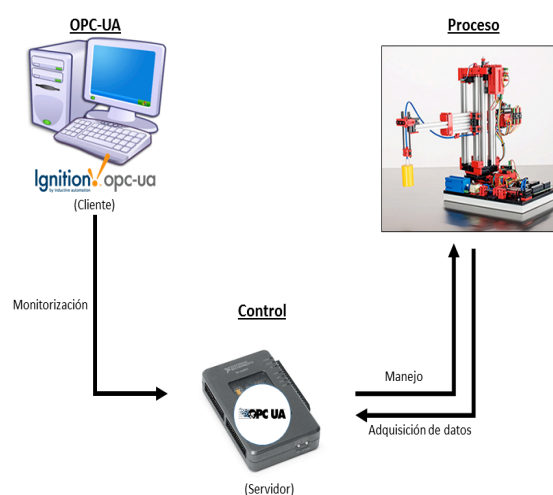


Figura 6: Esquema de la solución control mediante NI myRIO con servidor OPC-UA.

1. Implementación de un servidor OPC-UA en el sistema empotrado NI myRIO mediante los objetos OPC de los que dispone el sistema.
2. Vinculamos las variables a los Tags del servidor OPC-UA.
3. Ponemos en marcha el servidor OPC-UA dentro del sistema empotrado NI myRIO.

Después de haber desplegado todo el sistema antes enumerado, procedimos a comprobar si éramos capaces de acceder a los datos habilitados en el servidor OPC-UA a través de un cliente OPC-UA. Gracias a la capacidad de comunicarnos con el sistema empotrado a través de OPC-UA somos capaces de monitorizar y manejar el proceso controlado por NI myRIO gracias a la escritura de valores en las variables del árbol de Tags.

4.5 Interconexión de servidores OPC-UA desplegados en diferentes arquitecturas

Dado que para testear que el despliegue del servidor OPC-UA sobre el sistema empotrado NI myRIO se había realizado correctamente precisábamos de un cliente OPC-UA, decidimos llevar a cabo la prueba que aborda el actual caso de uso, que consiste en llevar a cabo la inclusión del servidor OPC-UA dentro de un servidor OPC-UA Ignition desplegado sobre un PC

1. Preparamos el servidor OPC-UA dentro del sistema empotrado NI myRIO.
2. Desplegamos el servidor OPC-UA de Ignition sobre un PC.
3. Comunicamos ambos servidores a través del protocolo de comunicaciones OPC-UA.
4. Visualizamos el árbol de Tags del servidor OPC-UA de myRIO a través del cliente OPC-UA que incorpora Ignition.
5. Realizamos operaciones de lectura y escritura sobre las variables de NI myRIO a través del cliente OPC-UA de Ignition.

Tras realizar las pruebas anteriormente enumeradas se pudo concluir que gracias al protocolo OPC-UA éramos capaces de llevar a cabo la monitorización y el manejo del proceso industrial mediante lecturas y escrituras de las variables del sistema empotrado NI myRIO desde el cliente OPC-UA desplegado en el PC.

6 CONCLUSIONES

Tras llevar a cabo los casos de uso antes expuestos, las conclusiones que obtuvimos fueron:

- El sistema de control implementado en el PLC con un módulo de entradas/salidas digitales no era suficiente para poder

controlar de forma eficiente el posicionamiento de la grúa, ya que la frecuencia de muestreo de las entradas digitales del PLC era menor que la frecuencia de las señales de los encoders, por lo tanto, éramos incapaces de detectar todos pasos, lo que provocaba errores en el posicionamiento de la grúa.

- El sistema de división de pulsos virtual resulto de utilidad, ya que al reducir la frecuencia de las señales de los encoders el PLC era capaz de contabilizar los pasos sin perdida alguna de señales, sin embargo, como consecuencia de la división de pulsos, se perdió precisión en el posicionamiento de la grúa.
- El sistema empotrado de tiempo real NI myRIO resulto ser la solución idónea para el experimento que nos ocupa, ya que gracias a sus prestaciones y a sus entradas y salidas digitales, fuimos capaces de llevar a cabo un posicionamiento preciso, sin apenas errores, de la grúa. Se determinó que el error de posicionamiento detectado en ocasión estaba provocado por errores mecánicos de la grúa, ya que al tratarse de una maqueta los engranajes patinaban provocando que la grúa se detuviese unos pasos por delante de la posición establecida.
- El control del proceso mediante NI myRIO ofrece como ventajas frente al control del proceso mediante PLC una mayor versatilidad al programar el sistema y llevar a cabo el control del proceso gracias la utilización de una FPGA, unos tiempos de respuesta más cortos que el módulo de E/S digitales estándar del PLC y un coste económico menor, ya que para conseguir llevar a cabo el control del proceso mediante el PLC se precisa de un módulo específico de E/S digitales rápidas, cuyo coste sin la CPU del PLC ya supera el coste de sistema empotrado NI myRIO.

Referencias

- [1] Burns, Wellings: **Real-Time Systems and programming Languages**
- [2] N. Instruments, **MyRio. National Instruments, 2015.**
- [3] Website: <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega>
- [4] Wolfgang Mahnke, Stefan-Helmut Leitner, **OPC Unified Architecture, 1ª Edición, 2009.**

Control de la Ejecución en Sistemas de Criticidad Mixta

A. Crespo, P. Balbastre, J. Simó

Universitat Politècnica de València, (acrespo,patricia.jximo)@ai2.upv.es

J. Coronel

FentISS, (jcoronel@fentiss.com)

Resumen

En sistemas de tiempo real y, en general, en sistemas críticos, hay una tendencia en alza en utilizar aplicaciones con diferentes niveles de criticidad. Las soluciones basadas en hipervisores son una forma de implementar sistemas de criticidad mixta ya que proporcionan aislamiento temporal y espacial. Sin embargo, la ejecución de una partición puede ser afectada por la ejecución en otros núcleos, lo que se conoce comúnmente como interferencias, poniendo en peligro la ejecución en el tiempo especificado. En este artículo se intenta contribuir dando soluciones realistas a este problema. Se propone una solución de control de la planificación con dos controladores al nivel del hipervisor. Uno de los controladores está orientado a limitar el uso de recursos compartidos a través de la limitación en el uso de los buses en los núcleos no críticos. El otro controlador mide la actividad del núcleo crítico y toma decisiones sobre la ejecución de los núcleos no críticos.

Palabras clave: Hipervisor, sistemas de criticidad mixta, control retroalimentado.

1. Introducción

En sistemas de tiempo real y, en general, en sistemas críticos, hay una tendencia en alza en utilizar aplicaciones con diferentes niveles de criticidad donde varios componentes con diferentes restricciones temporales se integran conjuntamente en una misma plataforma [7]. Las razones detrás de esta tendencia son principalmente no funcionales: reducir costes, volumen, peso y potencia consumida para diferentes sectores como el del control industrial, aviónica, espacio y automóvil por citar sólo algunos. Las capacidades de procesamiento que los sistemas multiprocesador empotrados pueden alcanzar permite unificar en la misma plataforma hardware cada vez más funcionalidades y aplicaciones. En ambos casos, hay una necesidad de integración de aplicaciones críticas y no críticas. Esta integración es conocida actualmente en la comunidad de tiempo real como sistemas de cri-

ticidad mixta [5].

Desde el punto de vista de la arquitectura software, hay una tendencia en utilizar técnicas de virtualización para proporcionar aislamiento temporal y espacial a las arquitecturas particionadas. Esta técnica se utilizó por primera vez en el sector de la aviónica[17] y se extendió posteriormente al sector espacial[18]. El soporte de virtualización de las particiones es proporcionada por el hipervisor. Los hipervisores son capas de software que aprovechan las funcionalidades del hardware para establecer entornos de ejecución independientes. Esta tendencia se ha ido extendiendo y actualmente la mayoría de los procesadores ofrecen soporte de virtualización añadiendo un nivel más al modo de operación del procesador.

Las soluciones basadas en hipervisores son una forma de implementar sistemas de criticidad mixta, especialmente en sistemas multi núcleo. Las principales propiedades del hipervisor tiene que ver con el aislamiento temporal y espacial de las particiones software que se ejecutan por encima del hipervisor. Una partición se define como un entorno de ejecución que contiene una aplicación y su propio sistema operativo ejecutándose en su espacio de memoria propio. Los mecanismos del hipervisor proporcionan servicios para virtualizar los recursos hardware a las particiones. El hipervisor Xtra-tuM [9] es un hipervisor bare-metal para sistemas empotrados desarrollado en varios proyectos europeos [16] [10] y se está utilizando actualmente en varias misiones en el sector espacial.

Unos de los puntos cruciales en los sistemas críticos multi-núcleo es el aislamiento temporal. A este respecto, el hipervisor puede garantizar recursos temporales exactos y predecibles a las particiones. Sin embargo, la ejecución de una partición puede ser afectada por la ejecución en otros núcleos, lo que se conoce comúnmente como interferencias. Este problema, debido al uso de recursos compartidos, puede afectar a la ejecución de una partición crítica poniendo en peligro la ejecución en el tiempo especificado. Por tanto, estas interferencias introducen un factor de impredecibilidad en la ejecución de una tarea crítica y no permite estimar un límite superior en el tiempo de ejecución

de peor caso (WCET), introduciendo anomalías temporales [14].

En este artículo, nos centraremos en el control de la ejecución de sistemas particionados de criticidad mixta sobre un hipervisor. Se propone una solución de control de la planificación con dos controladores al nivel del hipervisor, el resto del artículo se organiza de la siguiente forma: el apartado 2 cuenta el estado del arte en este área. El apartado 3 describe los contadores de prestaciones utilizados por el hipervisor para definir el control. En el apartado 5 se presentan los objetivos del controlador y los mecanismos utilizados. El apartado 6 describe el ámbito de ejecución de los controladores. El apartado 7 presenta los resultados de los experimentos realizados sobre una plataforma multi núcleo. Finalmente, en el apartado 8 se comentan las conclusiones y el trabajo futuro.

2. Estado del arte

Hay muchos trabajos que han abordado el problema de los recursos compartidos en sistemas multi núcleo. En [1], se analiza el impacto de los buses compartidos, caches y otros recursos y sobre predicción de prestaciones.

En [6], se propone un protocolo de bus basado en TDMA junto con un segundo protocolo dinámico que facilita la integración de sistemas de criticidad mixta libre de interferencias.

En [12] se presenta un controlador de acceso a recursos compartidos por las tareas en ejecución. En [20], se define un mecanismo de protección de memoria que regula los accesos a la misma. En [13], se propone un controlador distribuido que para las tareas de baja criticidad cada vez que detecta que su ejecución puede hacer perder plazos a tareas de alta criticidad. En [19] se propone una infraestructura de planificación que utiliza contadores de prestaciones para calcular la latencia media de acceso a memoria.

Por otro lado, las técnicas de control y planificación controlan el uso de los recursos de una plataforma computacional por medio de controladores que actúan sobre las tareas en ejecución. Se han definido muchas estrategias en este sentido, entre otras: optimización del periodo [2], memoria como recurso compartido [15], ajuste de los periodos de las tareas para minimizar el hiperperiodo [3].

3. Contadores de monitorización de prestaciones

Los procesadores actuales proporcionan mecanismos para monitorizar el funcionamiento del sis-

tema, ofreciendo contadores de eventos que pueden ser leídos por las aplicaciones o los sistemas operativos. El monitor de prestaciones (Performance Monitor, PM) es un dispositivo que proporciona este mecanismo en el procesador multi núcleo PowerPC T2080 en la placa NXP QorIQ T2080RDB [11]. El procesador T2080 incluye cuatro núcleos de 64 bits e6500. El núcleo e6500 incluye un PM que proporciona un conjunto de PMCs (contadores de monitorización de prestaciones) para definir, habilitar y contar ciertas condiciones que pueden disparar la interrupción del monitor de prestaciones. Cada core puede configurar hasta seis contadores de 32 bits para almacenar eventos específicos.

Adicionalmente, el T2080 proporciona extensiones de hardware para virtualización y define un modo hipervisor que permite la ejecución del hipervisor. XtratuM ha sido portado a este procesador y proporciona virtualización completa, manejando los PMCs para almacenar eventos concretos durante la ejecución. Utilizando el PM, XtratuM proporciona la habilidad de contar eventos predefinidos por núcleo asociados con operaciones específicas, como ciclos de procesador, instrucciones ejecutadas, pérdidas de chace L1 y L2, accesos a bus de datos e instrucciones, etc.

Para cada contador se puede definir un umbral para disparar los eventos cuando un cierto valor es alcanzado. Los contadores pueden ser habilitados o deshabilitados según la necesidad del hipervisor o de las aplicaciones.

4. Planificación de hipervisor

XtratuM es un hipervisor bare-metal específicamente diseñado para sistemas empujados de tiempo real, ofreciendo para-virtualización o virtualización completa dependiendo del soporte del hardware.

Xtratum define el concepto de CPU (núcleo) virtual (vCPU), las cuales son abstracciones que modelan el comportamiento de la CPU y pueden ser asignadas a las CPUs reales. XtratuM abstrae tantas vCPUS como núcleos físicos existan. Las particiones pueden ser mono núcleo o multi núcleo (utilizan una o varias vCPUs). La asignación de vCPUS a CPUs se especifica en el fichero de configuración donde se define el sistema completo: hardware, dispositivos, planificación temporal, canales de comunicación, etc.

Una partición puede ser una aplicación compilada para ejecutarse sobre máquina desnuda, una aplicación de tiempo real con su propio sistema operativo de tiempo real o una aplicación ejecutándose sobre un sistema operativo de propósito

general. Las aplicaciones multi núcleo requieren un sistema operativo SMP y asignar varias CPUs a la partición.

La arquitectura software de un sistema particionado multi núcleo se muestra en la Figura 1. En la figura se muestra un sistema integrado por 5 particiones mono núcleo y una partición multi núcleo. También se muestra la asignación de núcleos virtuales a núcleos reales. P0 y P1 se asignan a la CPU0, P3 y P4 a la CPU1, P5 a la CPU2 y las dos vCPUs de P6 a las CPU2 y CPU3 respectivamente. Todas las tareas de una partición se ejecutan en su CPU asignada. La partición SMP planifica internamente qué tareas se asignan a cada vCPU y, en consecuencia, en qué CPU real se ejecutan.

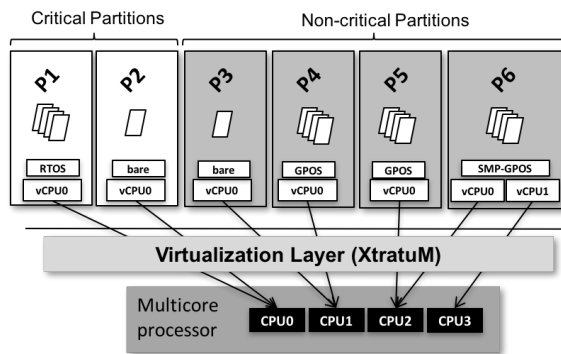


Figura 1: Arquitectura particionada en plataforma multi núcleo

La generación del plan cíclico debe considerar el impacto de los recursos compartidos (accesos a bus, caches L2, memoria, etc) en la ejecución de las tareas. En la herramienta Xoncrete [4] se implementan estas técnicas de planificación. En [8], se define una metodología para generar planes cíclicos en sistemas multi núcleo de criticidad mixta.

El número de núcleos se determina calculando la utilización de cada partición y asignando las particiones a los núcleos mediante técnicas de bin-packing.

El plan generado se caracteriza por:

- Todas las particiones críticas se asignan a un subconjunto de núcleos llamados CC.
- Las particiones no críticas se asignan a otro subconjunto llamado NCC.
- Cada tarea en una partición tiene asignado su propio slot en un núcleo.
- Se considera el tiempo de ejecución de peor caso incrementado por un factor que tiene en cuenta la interferencia entre núcleos.

En este artículo se asume que las particiones críticas están alojadas en un solo núcleo mientras que las no críticas pueden estar en varios núcleos. Sin embargo, el esquema de control propuesto es compatible con la ejecución de particiones no críticas en el núcleo crítico CC. Como trabajo futuro se considerarán más de un CC.

5. Controladores de ejecución

El objetivo de los controladores es limitar la interferencia producida por las aplicaciones de los núcleos no críticos (NCP) sobre el crítico (CP).

Las aplicaciones críticas ejecutándose en los núcleos críticos tienen que asegurar el cumplimiento de las restricciones temporales y, en consecuencia, los controladores no pueden actuar directamente sobre su ejecución. Sin embargo, los núcleos no críticos pueden suspender su ejecución durante los intervalos en que su ejecución comprometa las aplicaciones críticas.

La figura 2 muestra el esquema de control propuesto.

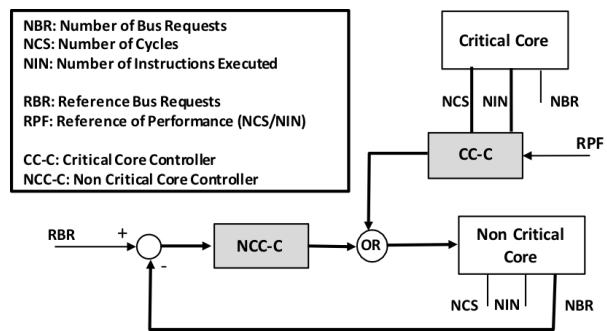


Figura 2: Esquema de control

Inicialmente, se consideraran 2 núcleos. El C_0 ejecuta particiones críticas y el C_1 las aplicaciones no críticas. El núcleo no crítico (NCC) lee las peticiones de bus y las compara con una referencia determinada. Cuando la lectura excede la referencia, se toma la acción sobre el NCC. En cambio, el núcleo crítico lee los ciclos e instrucciones de la unidad de prestaciones y calcula la relación de ciclos por instrucción (CPI) y si excede la referencia, se toma una acción sobre el núcleo no crítico.

Ambos controladores son basados en eventos con el fin de limitar las ejecuciones del hipervisor y por lo tanto reducir la sobrecarga del sistema. Esto se puede conseguir debido a que los contadores de prestaciones se pueden configurar para generar una interrupción sobre el núcleo correspondiente cuando se alcanza un valor limite que es la referencia.

6. Ámbito de actuación de los controladores

Se asume, por simplicidad, que se dispone de 2 núcleos y 4 particiones. P0 y P1 se consideran críticas y P2 y P3 no críticas.

La implementación de los controladores se realiza a nivel de hipervisor. Para definir su comportamiento se definen un conjunto de requisitos.

Req1 : Si un núcleo crítico está inactivo, su controlador esta deshabilitado.

Req2 : Al empezar la ejecución de una ranura de tiempo de una partición crítica, se activan ambos controladores

Req3 : Cuando el controlador del núcleo crítico toma la acción de suspender la actividad del no crítico, la ejecución de la partición actual y futuras se suspenden.

Req4 : Cuando el controlador del núcleo no crítico toma la acción de suspenderse, la ejecución de la partición actual se suspende hasta que se reanude externamente.

Req5 : Cuando una partición crítica finaliza su ejecución, los controladores se deshabilitan y se reanuda la actividad suspendida en los núcleos no críticos.

Req6 : Las comunicaciones entre núcleos se realizan mediante interrupciones entre núcleos (IPIs).

Req7 : Las decisiones y acciones a tomar han de ser simples con el fin de reducir la sobrecarga del hipervisor.

Req8 : Los controladores estarán basados en eventos con el fin de acotar el número de interrupciones.

En conclusión, el ámbito de los controladores de núcleo crítico será la ranura de tiempo de su ejecución. Los controladores de los núcleo no críticos será el mismo que el del anterior.

La figura 3 muestra un posible escenario de ejecución y activación de los controladores. La evolución de los contadores de prestaciones se muestra como ejemplo en la figura.

Durante la inicialización del hipervisor, se identifican los núcleos disponibles y se crea un hilo de ejecución interno para cada núcleo (HT0 and HT1). En t_0 , HT0 detecta el inicio de P0 e identifica (definido en la configuración) que es crítica y habilita los controladores definiendo los valores de referencia de estos. Al mismo tiempo, en t_0 , HT1

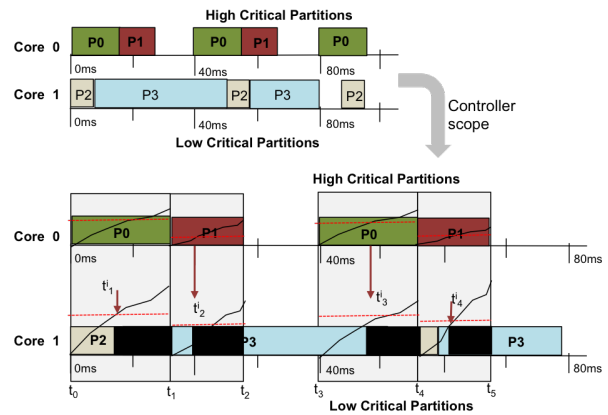


Figura 3: Controller scope

empieza la ejecución de P2 recibiendo una IPI de C_0 que indica que lo habilita. En el intervalo $[t_0, t_1]$, HT0 recibe varias interrupciones del contador de instrucciones y calcula el valor del CPI. Cuando este valor sea superior a la referencia suspenderá la actividad del C_1 (t_1^i).

En t_1 , P0 termina y envía una IPI a C_1 para que reanude su ejecución. En t_2^i , como consecuencia de la interrupción y del cálculo del PCI, se suspende el C_1 .

En t_2 , HT0 termina y envía la IPI para que C_1 reanude la ejecución. HT0 lee la siguiente ranura de tiempo y detecta que en el instante t_3 se iniciará. De la misma manera, la acción en t_3^i es suspender, mientras que en t_4^i , C_1 se autosuspende.

El escenario anterior se puede extender a múltiples núcleos no críticos. Cada uno de éstos tiene su propio controlador local. La acción tomada por el crítico de suspender la actividad afecta a todos los no críticos. Asimismo, la acción de reanudar la ejecución es para todos ellos.

La figura 4 muestra el esquema de controladores para múltiples núcleos no críticos.

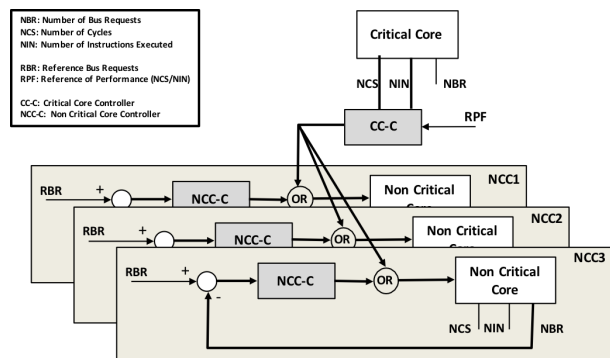


Figura 4: Esquema controladores para múltiples núcleos no críticos

7. Experimentación

En esta sección se detallan los escenarios evaluados y la influencia de los controladores. Después de un detallado análisis de los contadores de prestaciones, se han seleccionado 3 eventos para la implementación. Estos eventos son: `PME_PROCESSOR_CYCLES` que cuenta el número de ciclos, `PME_INSTR_COMPLETED` que cuenta el número de instrucciones ejecutadas y `BIU_MASTER_REQUESTS` que indica el número de peticiones de acceso a bus. Los eventos pueden contar cuando el procesador está en modo usuario, núcleo o hipervisor.

Estos escenarios se han ejecutado en la plataforma T2080 con una partición crítica (*CPart*) y de 0 a 3 particiones no críticas en los otros núcleos. Las particiones no críticas se consideran que van a interferir en la crítica y se identifican como dummies. El solapamiento entre la crítica y las no críticas varía en los experimentos con el fin de mostrar distintas situaciones y las acciones tomadas. El objetivo es medir el tiempo de respuesta de la partición crítica comparando su ejecución de forma aislada con su ejecución cuando hay otros núcleos en ejecución. Se han definido cuatro escenarios: *SC1* los controladores no están activos, *SC2* utiliza controladores locales, *SC3* usa el controlador del núcleo crítico y *SC4* utiliza ambos tipos. En las gráficas se identifican las gráficas mediante el número de particiones (dummy) no críticas en ejecución (n-D) y el intervalo de tiempo en el que se ejecutan.

7.1. Evaluación de escenarios

La figura 5 muestra la ejecución de *CPart* en todas las situaciones. El eje X representa el tiempo en milisegundos (aunque se leen los ciclos del procesador) mientras que el eje Y presenta las instrucciones ejecutadas.

En esta situación, *CPart* termina su ejecución después de 278ms si no hay interferencia. Cuando se ejecuta con 1,2 y 3 particiones en otros núcleos, su tiempo de ejecución es 409, 591 y 802 milisegundos, respectivamente.

La figura 6 muestra lo mismo que lo anterior pero con los controladores locales de los núcleos no críticos activados. La referencia puesta al *C_1* cuando se ejecuta 1 partición no crítica no es alcanzada por lo que se ejecuta sin suspensión. Cuando se ejecutan 2 particiones, *C1* y *C2* se suspenden en los instantes 426 y 477 ms, respectivamente. Cuando son 3 no críticas, las suspensiones se producen en los instantes 413, 426 and 478 ms, respectivamente.

La figura 7 muestra la ejecución del escenario *SC3*

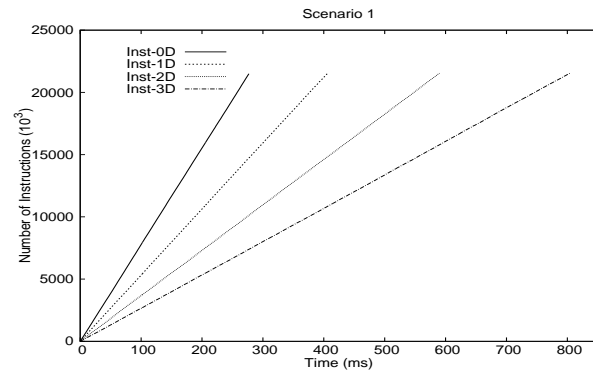


Figura 5: Todos los controladores están desactivados.

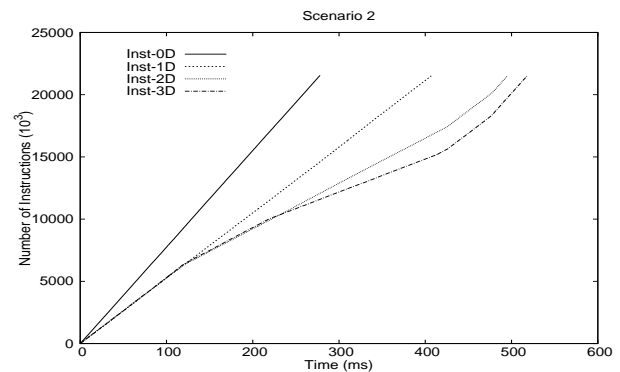


Figura 6: Los controladores locales están activados

con el controlador del núcleo crítico activado. En este caso, en el instante 205 ms suspende la actividad de *C1* cuando sólo hay otro núcleo activo, en 245 ms cuando hay dos y en 252 ms cuando hay tres. En este caso, la suspensión es de todos los núcleos no críticos.

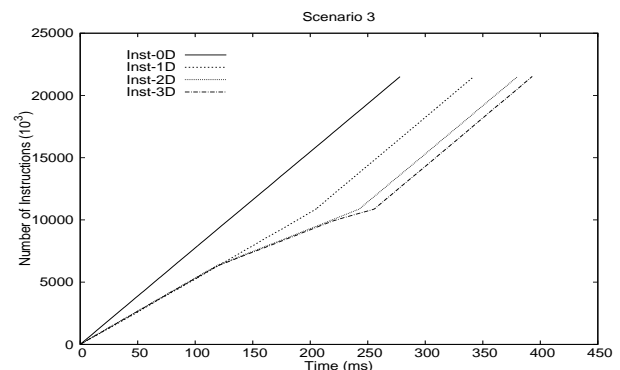


Figura 7: El Controlador crítico está activado

La figura 8 corresponde con el escenario *SC4*. En este caso, también es el controlador del núcleo crítico el que toma la decisión antes de los locales. En 206, 130 y 122 ms, se suspenden cuando hay 1, 2 o 3 núcleos no activos.

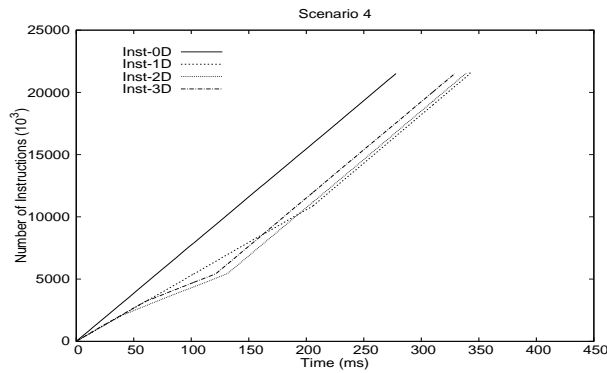


Figura 8: El controlador crítico y los locales activados

La conclusión de esta experimentación es que es posible controlar la ejecución de las actividades críticas en un sistema multi-núcleo. No obstante, es necesaria una identificación de estas actividades que permita determinar los parámetros apropiados de referencia para los controladores.

8. Conclusiones

En este artículo se ha propuesto un controlador implementado a nivel del hipervisor para controlar la ejecución de aplicaciones críticas en una plataforma multi núcleo. Se ha definido también el ámbito y el esquema del controlador, siendo este efectivo sólo cuando se están ejecutando las aplicaciones críticas. Las acciones de control sobre las aplicaciones críticas son simples: suspender la ejecución de los núcleos dedicados a las aplicaciones no críticas. Esto es debido a que las acciones a tomar por el hipervisor deben ser extremadamente sencillas de cara a facilitar una futura certificación y a evitar decisiones complejas que puedan incrementar la sobrecarga de tiempo de ejecución.

El trabajo futuro se centra en el ajuste del controlador y en cómo los parámetros de las particiones pueden tenerse en cuenta en el fichero de configuración del sistema para permitir al hipervisor definir las referencias más adecuadas para los controladores.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco de los proyectos de investigación M2C2 (TIN2014-56158-C4-01/02) y PROMETEOII/2014/031 (Generalitat Valenciana).

Referencias

- [1] A. Abel and et al. Impact of resource sharing on performance and performance prediction: A survey. In *Proc. 24th Int. Conf CONCUR*

2013, Buenos Aires, Argentina, Aug. 27-30., pages 25–43, 2013.

- [2] E. Bini and M. D. Natale. Optimal task rate selection in fixed priority systems. In *Proceedings of the 26th IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS 2005)*, 6-8 Dec. 2005, Miami, FL, USA, pages 399–409, 2005.
- [3] V. Brocal, P. Balbastre, R. Ballester, and I. Ripoll. Task period selection to minimize hyperperiod. In *IEEE 16th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation, ETFA 2011, Toulouse, France, Sept. 5-9, 2011*, pages 1–4, 2011.
- [4] V. Brocal, R. Masmano, I. Ripoll, A. Crespo, and P. Balbastre. Xoncrete: a scheduling tool for partitioned real-time systems. In *Embedded Real-Time Software and Systems*, 2010.
- [5] A. Burns and R. I. Davis. Mixed criticality systems - a review, Ed. 2017. Univ. York. Internal Report.
- [6] B. Cilku, A. Crespo, P. Puschner, J. Coronel, and S. Peiro. A tdma-based arbitration scheme for mixed-criticality multicore platforms. In *Int. Conf. on Event-based Control, Communication and Signal Processing (EBCCSP)*, pp: 17-19, 2015. Krakow. Poland, 2015.
- [7] E. Commision. Workshop on Mixed Criticality Systems, 2012. Brussels. cordis.europa.eu/fp7/ict/computing/homeen.html.
- [8] A. Crespo, P. Balbastre, J. Simo, and P. Albertos. Static scheduling generation for multicore partitioned systems. In *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Vol. 376., pages 511–522, 2016. Int. Conf. on Information Science and Applications, ICISA 2016, Ho Chi Min, Vietnam, Feb 2016.
- [9] A. Crespo, I. Ripoll, S. Peiró, and R. Masmano. Partitioned embedded architecture based on hypervisor: Then XtratuM approach. In *EDCC*, pages 67–72, 2010.
- [10] DREAMS. Distributed real-time architecture for mixed criticality systems, 2013. EU FP7-ICT-610640 2013-17.
- [11] I. Freescale Semiconductors. E6500rm, e6500 core reference manual - reference manual, Mon Jun 9 19:06:06 2014.
- [12] S. Girbal, X. Jean, J. L. Rhun, D. Gracia Pérez, and M. Gatti. Deterministic platform

- software for hard real-time systems using multi-core cots. In 34th Digital Avionics Systems Conference (DASC'2015), Prague, Czech Republic, 2015. Thales Research & Technology.
- [13] A. Kritikakou, C. Rochange, M. Faugère, C. Pagetti, M. Roy, S. Girbal, and D. Gracia Pérez. Distributed run-time WCET controller for concurrent critical tasks in mixed-critical systems. In 22nd International Conference on Real-Time Networks and Systems, RTNS 2014, Versailles, France, October 8-10, 2014, page 139, 2014.
 - [14] T. Lundqvist and P. Stenström. Timing anomalies in dynamically scheduled microprocessors. In IEEE Real-Time Systems Symposium, pages 12–21, 1999.
 - [15] A. Marchand, P. Balbastre, I. Ripoll, R. Masmano, and A. Crespo. Memory resource management for real-time systems. In 19th Euromicro Conf. on Real-Time Systems, ECRTS'07, 4-6 July 2007, Pisa, Italy, pages 201–210, 2007.
 - [16] MultiPARTES. Multi-cores partitioning for trusted embedded systems, 2011. EU FP7-ICT-287702 2011-14.
 - [17] J. Rushby. Partitioning in avionics architectures: Requirements, mechanisms, and assurance, 1999.
 - [18] J. Windsor and K. Hjortnaes. Time and space partitioning in spacecraft avionics. Space Mission Challenges for Information Technology, 0:13–20, 2009.
 - [19] Y. Ye, R. West, J. Zhang, and Z. Cheng. MA-RACAS: A real-time multicore VCPU scheduling framework. In 2016 IEEE Real-Time Systems Symposium, RTSS 2016, Porto, Portugal, November 29 - December 2, 2016, pages 179–190, 2016.
 - [20] H. Yun, G. Yao, R. Pellizzoni, M. Caccamo, and L. Sha. Memguard: Memory bandwidth reservation system for efficient performance isolation in multi-core platforms. In 19th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, RTAS 2013, Philadelphia, PA, USA, April 9-11, 2013, pages 55–64, 2013.

GENERACIÓN AUTOMÁTICA DEL PROYECTO DE AUTOMATIZACIÓN TIA PORTAL PARA MÁQUINAS MODULARES

Darío Orive, Aintzane Armentia, Eneko Fernández, Marga Marcos.
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática
Universidad del País Vasco / Euskal Herriko
Unibertsitatea

dario.orive@ehu.eus, aintzane.armentia@ehu.eus, eneko.fernandez.alonso@gmail.com,
marga.marcos@ehu.es

Resumen

Uno de los retos de la Industry 4.0 es disponer de sistemas de fabricación más flexibles y eficaces, que permitan fabricar productos cada vez más personalizados, adaptados a la demanda de los clientes. Esto unido a que esta flexibilidad se logre a un precio competitivo ha llevado al concepto de máquina modular. La máquina se concibe como un conjunto de componentes mecatrónicos que incluye una parte física (mecánica, eléctrica y electrónica), y el software y hardware necesario para controlarla. Estos componentes pueden fabricarse en serie. Diferentes combinaciones de componentes mecatrónicos permiten fabricar máquinas que se adaptan a las demandas del cliente.

Este artículo propone un modelo para la máquina modular a partir cual es posible generar de forma automática el proyecto TIA Portal, utilizando tecnologías XML.

Palabras Clave: *Industry 4.0, Modularity, Automation System, Automatic code generation, Flexible manufacturing systems.*

1. Introducción

Es de sobra conocida la tendencia generalizada a introducir mayores niveles de automatización en los procesos de fabricación, persiguiendo como objetivo conseguir productos de mejor calidad y precios más competitivos. Los procesos de fabricación cada día son más complejos, con tiempos de cadencia de producción cortos entre series de producción pequeñas, requiriendo además un alto nivel de flexibilidad para adaptarse a las necesidades del mercado[1].

Otro requisito demandado es el de acortar el tiempo necesario para modificar la línea de producción con el objetivo de reducir los tiempos de parada de la línea.

También se prevé que los procesos de fabricación tengan que ser más flexibles para adaptarse a fabricar lotes de productos mucho más pequeños que los actuales, y más personalizados a las necesidades de los clientes finales. Todas estas adaptaciones y cambios en los procesos de fabricación deben realizarse de forma ágil, rápida y fiable.

Estos son solo algunos de los retos de lo que se ha denominado en Europa la Industry 4.0 o lo que otros denominan como 4ª revolución industrial [2]. Son muchos los objetivos planteados bajo este paradigma, tanto de tipo tecnológico como de tipo económico. Sin embargo, todos ellos se caracterizan por la introducción de modernas tecnologías como elemento habilitador de la competitividad. Entre sus objetivos destacan la digitalización en todas las fases del ciclo de vida del producto, así como la extracción de conocimiento adquiriendo y procesando información a lo largo del ciclo de vida. La acción combinada de ambas es la base para construir sistemas de fabricación más flexibles y eficientes que los actuales.

El diseño modular de sistemas de fabricación [3] es una idea que se ha propuesto en diferentes trabajos. Así, [4] focaliza en aspectos de la granularidad de los módulos para conseguir altos grados de reutilización con mínimo esfuerzo. En [5] se propone la definición y diseño de un sistema de automatización capaz de asegurar su disponibilidad mediante técnicas y tecnologías de modelado y tecnología multi-agente. [6] estudia la problemática del control de versiones de software. En [7] se analiza aspectos de cómo generar el programa de control de sistemas

modulares, en un entorno multidisciplinar de tres formas diferentes; basada en librería central, en base a parámetros y basada en plantillas. En estos trabajos, la modularidad se utiliza para facilitar el diseño del sistema de control. Pero en prácticamente todos ellos, bien a través del modelado, bien a través de la codificación, existen procesos manuales que son propensos a error. Sólo en [8] se propone una generación automática de código modular. Ahora bien, los módulos físicos se definen de forma abstracta y es el usuario el que debe modelar la máquina, definiendo todos sus componentes.

Esta es precisamente la aportación de este trabajo: a través de la definición de la máquina modular en base a componentes mecatrónicos reutilizables, permite automatizar la definición de nuevas máquinas, asegurando la corrección de la definición y generando el proyecto de automatización (hardware y software) de la máquina completa. De esta forma se eliminan tareas repetitivas (como cambio de nombres de variables o asignación de direcciones de entrada/salida) y propensas a error. Concretamente se realiza para Controladores Lógicos Programables desde la herramienta TIA Portal de Siemens utilizando el API TIA Portal Openness que facilita la manipulación automática de proyectos completos.

La estructura del artículo es la siguiente: En el apartado 2 se propone el modelado de la máquina modular desde el punto de vista funcional y de control (hardware-software), cuya implementación en casos concretos plasmará el grado de granularidad adecuado. Se ilustra con una propuesta concreta de máquina que es la que se utiliza en el resto de apartados. El apartado 3 se dedica a la generación automática del proyecto TIA Portal. Se presenta la arquitectura general de la aplicación de generación así como sus módulos principales. En el apartado 4 se presenta el caso de estudio de una máquina de ensayos de fugas. El artículo finaliza con el apartado de conclusiones y trabajos futuros.

2. Modelado modular de máquinas.

El modelado de la máquina modular que se propone se basa en dos vistas: La funcional, en la que la máquina está definida por un conjunto de módulos, de forma que un módulo puede estar a su vez formado por otros formando una jerarquía, y la de implementación que define el hardware y el software de control de la máquina.

A continuación se presentan ambas vistas y se ilustran para un caso concreto de jerarquía.

2.1 Vista funcional.

La vista funcional define los componentes que pueden conformar una máquina. Dado que esta vista define componentes físicos, se propone una estructura jerárquica que permite al diseñador establecer la granularidad deseada para definir los módulos físicos. De esta forma, un módulo funcional puede estar formado por otros módulos y dispositivos de entrada/salida que representan el conjunto de señales de los sensores y actuadores que se utilizan para controlar ese componente. El último nivel de la jerarquía de cada rama únicamente contiene dispositivos de entrada/salida. El meta-modelo de esta vista se ilustra en la Figura 1 mediante un diagrama de clases UML.

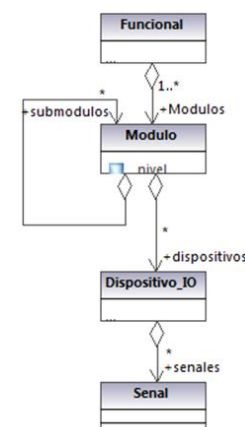


Figura 1 Meta-Modelo de la Vista Funcional

El meta-modelo se completa con dos reglas de composición: un módulo sólo puede contener módulos de un nivel inferior y los módulos de último nivel de la jerarquía sólo pueden contener dispositivos.

Para ilustrar el uso de esta vista, supongamos una ingeniería que diseña y monta máquinas que están formadas por un conjunto de bastidores sobre los que se ubican estaciones que pueden realizar operaciones de fabricación. Además, se contempla la existencia de módulos botonera (para el mando de la máquina, transporte (módulo opcional que puede existir para transportar la pieza entre máquinas), HMI y armario (que agrupa el resto de señales necesarias para el buen funcionamiento de la máquina). Siguiendo el meta-modelo de la Figura 1, es posible definir el meta-modelo de este tipo de máquinas definiendo los módulos básicos y sus relaciones. El meta-modelo resultante se ilustra en la Figura 2.

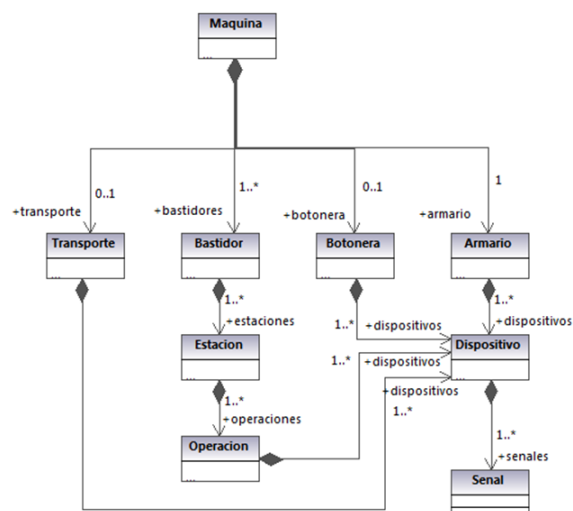


Figura 2 Meta-Modelo Funcional de un tipo de máquina

2.2 Vista de Implementación

La vista de implementación sigue el modelo de proyectos de automatización de TIA Portal (Siemens) que define los elementos del meta-modelo de la Figura 3.

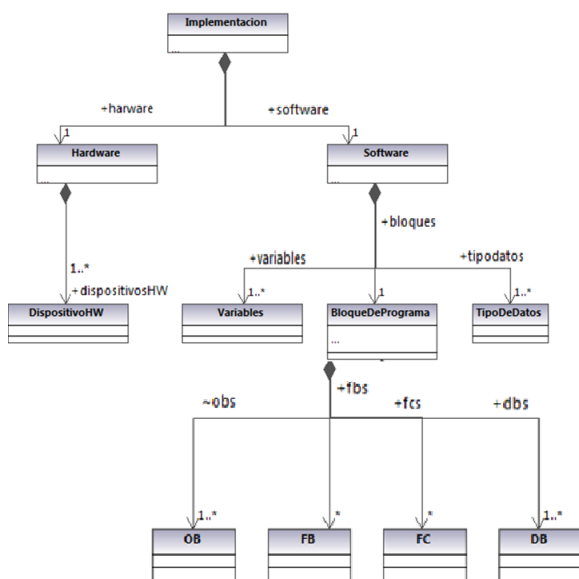


Figura 3 Meta-Modelo de la implementación

Para ilustrar la vista de implementación, la Figura 4 representa las propiedades de dispositivoHW. Como se puede observar, en este caso se ha caracterizado un dispositivo de una red Profinet. Cada dispositivo se caracteriza por un nombre, el nombre Profinet y la dirección IP (necesarios para configurar la red) así como la dirección inicial de señales de E/S.

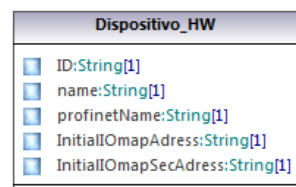


Figura 4 Dispositivo_HW

La máquina modular está formada por las dos vistas y las relaciones entre ellas. Concretamente, existe una relación entre los dispositivos hardware de la vista de implementación y el dispositivo IO de la vista funcional. Por otro lado, cada señal de la vista funcional corresponde a una variable y una dirección física en la tabla de variables. Por otro lado, los módulos de la vista funcional se mapean a bloques de programa.

3. Generación automática del proyecto TIA Portal

La Figura 5 representa la arquitectura de alto nivel de la aplicación de generación.

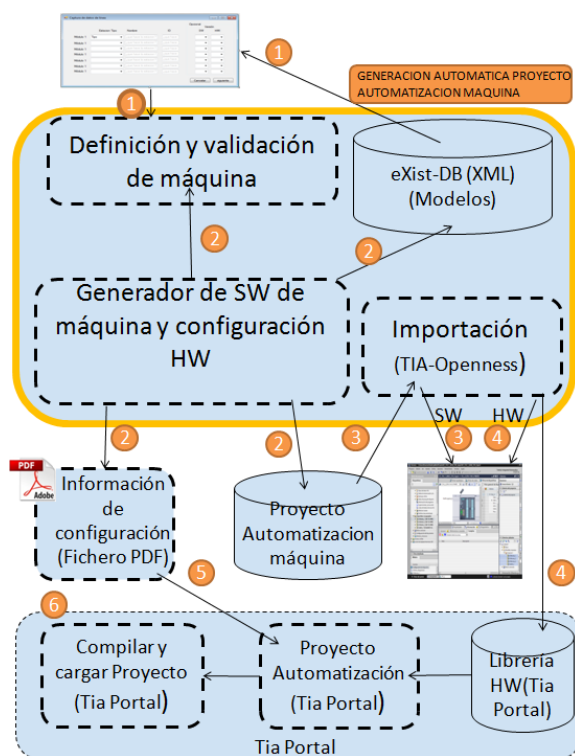


Figura 5 Arquitectura general

La aplicación de generación de un proyecto de automatización está dividida en una serie de fases: se comienza definiendo una nueva máquina que está compuesta por un conjunto de módulos con diferentes funcionalidades. Por cada módulo que compone la máquina (y que puede contener una jerarquía de módulos) se dispone de un proyecto TIA

Portal que corresponde a su modelo de implementación. La aplicación debe resolver etiquetas de código, variables y direcciones Profinet duplicadas y generar el código final.

Se ha definido una base de datos orientada a modelos que contiene todos los proyectos de automatización tipo correspondiente a módulos funcionales, así como las nuevas máquinas definidas.

La base de datos elegida ha sido eXist-db [9], que es del tipo NoSQL, y XML nativa lo que la hace adecuada para el manejo y almacenamiento de modelos en formato XML, que es el formato en el que se almacena la información de los modelos.

Una de las características de esta base de datos es que no se necesita especificar un XML schema de la información que se almacena, lo cual da mucha flexibilidad para introducir diferentes tipos de documentos, y para futuras ampliaciones. Esto no significa que no se puedan hacer validación de los documentos XML que se introduzcan.

eXist-DB es independiente de la plataforma, dado que está basada en java, al igual que su API. Esta API permite el uso de lenguajes query como Xpaht o Xquery. También permite la administración de usuarios, permisos, indizado...

La administración de los datos se consigue por medio de colecciones de documentos jerárquica, por los que se pueden realizar las acciones sobre conjuntos de documentos. Para actualizar o borrar documentos se puede hacer uso del lenguaje XUpdate, que nos permite actualizar el documento entero o la elección de los nodos a actualizar. También provee de mecanismos de copias de seguridad y restauración (Backup/restore). El motor de la base de datos tiene funciones básicas de seguridad, como puede ser el control de acceso mediante contraseña de los usuarios a los grupos que pertenezcan.

La elección de una base de datos XML nativa se debe a que la herramienta TIA Portal ofrece TIA Portal Openness, un API que permite acceder a la estructura de la herramienta TIA Portal, de forma remota y modificar el contenido de la misma. De esta forma se pueden generar proyectos de automatización utilizando objetos almacenados en librerías u objetos externos importados en XML.

También, se puede acceder a los datos de proyectos para su posterior procesamiento, extraer datos estadísticos, realizar copias de seguridad o actualizar el contenido de los proyectos.

Entre las funcionalidades ofrecidas por TIA Portal Openness, caben destacar las siguientes:

- *Manipulación* de ciertos objetos de un proyecto, p.e. (carpetas, hardware, bloques

de programa, variables, tipos de variables, ...), tanto del PLC, como del HMI.

- *Utilización* de librerías, tanto del proyecto, como librerías globales.
- *Exportación e importación* de información relativa al software de proyectos.
- *Ejecución* de comandos relacionados con tareas del TIA Portal, como por ejemplo compilar un proyecto ya generado y cargar el proyecto en el PLC.

Por otro lado, un proyecto de automatización TIA Portal contiene toda la información relacionada con todos los controladores del proyecto. Por cada controlador se genera una estructura de directorios, tal y como se ilustra en la Figura 6. En ella se puede observar que la estructura de carpetas relativas al software coincide con la del meta-modelo de la Figura 3: la carpeta de “bloques de programa”, en la cual se organizan todos los bloques de programa del PLC (OB, FB, FC, DB), la carpeta “variables PLC”, donde están declaradas las variables globales del programa del PLC y la carpeta de “tipos de dato de PLC”, en la que se pueden definir tipos de dato de usuario específicos para la aplicación. Estas carpetas se generan automáticamente vacías en TIA Portal cuando se inserta un PLC y se va introduciendo el contenido a medida que se va desarrollando el proyecto.

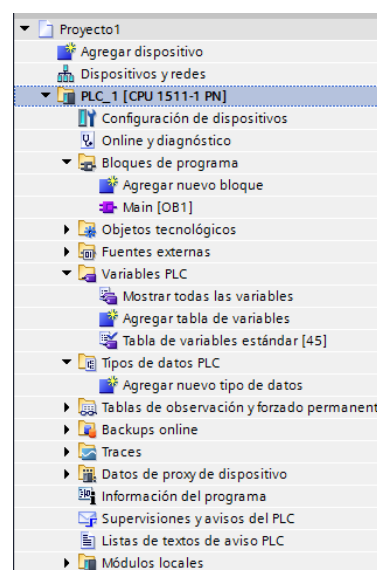


Figura 6 Árbol de directorios de PLC en TIA Portal

A continuación se describen los pasos que ejecuta la aplicación de generación:

3.1 Captura de datos de definición de la máquina

Se ha desarrollado una aplicación que permite, que el operador defina las características de la máquina. Dispone de un interfaz de usuario que accede a la

base de datos de la que se extraen los proyectos tipo definidos, que pueden utilizarse en la composición de la máquina. Esto corresponde al paso 1 de la Figura 5.

Para los tipos de máquinas definidos en la Figura 2 la aplicación ofrece los componentes mecatrónicos que son los de primer nivel: Bastidor, Transporte, Botonera y Armario.

Figura 7 Interfaz de definición de la máquina.

Base de datos orientada a modelos

Una vez definida la máquina a partir de módulos funcionales, la aplicación accede a la base de datos orientada a modelos que contiene los modelos de implementación que siguen la estructura TIA Portal correspondientes a los módulos funcionales tipo, paso 2 de la Figura 5.

La Figura 8 representa las colecciones de la base de datos para el caso de la máquina tipo definida en la sección 2. Contiene los modelos de implementación (bastidor, transporte, botonera, armario y HMI) de los que se van a componer las máquinas. Cada modelo representa la información relativa a un proyecto de automatización con toda la estructura hardware y software, siguiendo el meta-modelo de la Figura 3. La estructura sigue el Schema XML de la Figura 9. Además, los proyectos de automatización de las nuevas máquinas definidas, se almacenan como proyectos máquinas tipo para su posterior reutilización.

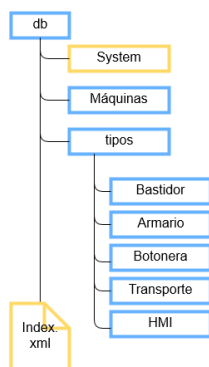


Figura 8 Estructura de la base de datos de modelos de implementación

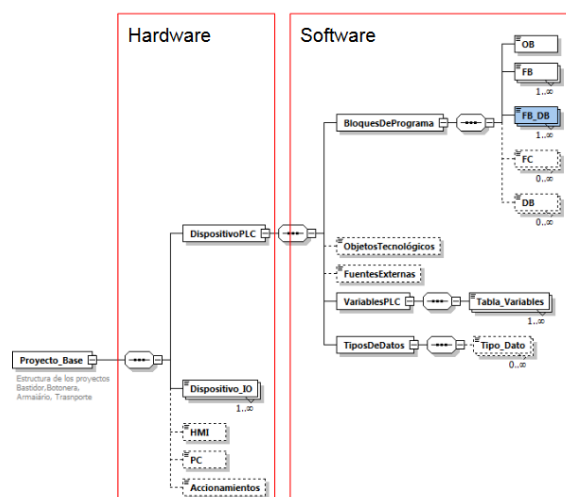


Figura 9 Schema de proyecto tipo

3.2 Generación del Proyecto Máquina

El proyecto Máquina se genera a partir de los proyectos tipo de los módulos que la componen.

Esta parte de la aplicación se encarga de adaptar el código y los datos de cada proyecto tipo, para asegurar que las instancias en el código generado sean correctas, paso 2 de la Figura 5.

Esta operación se realiza en las siguientes fases:

- Fase 1. Se dispone del archivo de definición de la máquina en formato XML, generado en el paso 1. La aplicación extrae de él la información necesaria para seleccionar de la base de datos los proyectos tipo con los que se va a construir la máquina.
- Fase 2. Adaptación de las variables globales (Tipos de datos, DB globales, Tablas de variables) de aquellos módulos tipo con más de una instancia. A modo de ejemplo, la Figura 10 representa las modificaciones que habría que realizar en una tabla de variables en cada instancia del mismo módulo.
- Fase 3. Modificación de los nombres de los parámetros actuales que se utilizan en las instancias de los módulos de programa, haciendo uso de las variables declaradas en las tablas de variables.
- Fase 4. Generación del modelo de implementación del proyecto de la máquina integrando en los OBs del mismo tipo de ejecución, el contenido de los OBs de cada módulo tipo. En el modelo final solo existe un OB de cada tipo de ejecución que integrará el código de todos los proyectos tipo. En la Figura 11 se indica la forma de proceder para la generación de los OBs.

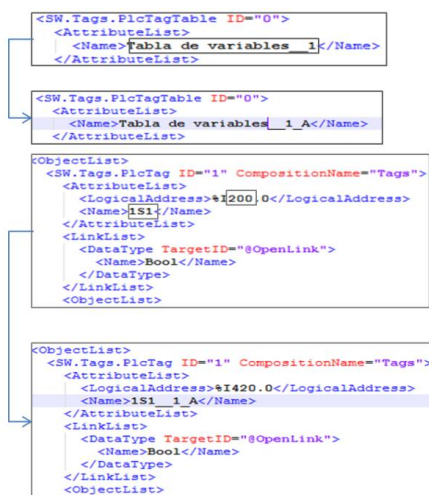


Figura 10 Adaptación de la tabla de variables

- Fase 5. Generación de un documento PDF con la documentación necesaria para la configuración del hardware y del sistema de comunicaciones de la máquina.

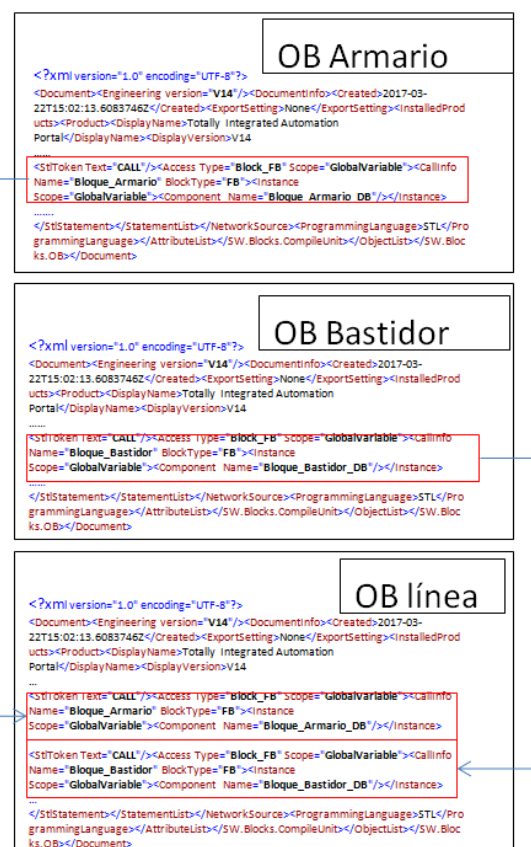


Figura 11 Generación del OB1 del proyecto máquina

3.3 Generación del proyecto en TIA Portal

El modelo de implementación de la máquina generado siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 3.3 se importa a la herramienta TIA Portal

utilizando las funciones del API TIA Portal Openness, paso 3 de la Figura 5.

La importación se realiza en dos fases:

- Fase 1. Utiliza la función de grupos para crear bloques, variables y tipos en una estructura de carpetas. La estructura de carpetas del proyecto generado en TIA Portal sigue la estructura del modelo funcional. Ver Figura 13.
- Fase 2. Importa el software del proyecto generado descrito en el apartado 3.3 a las diferentes carpetas del proyecto.

El hardware relacionado con los proyectos tipo se encuentra almacenado en la librería global de TIA Portal. Para completar el proyecto de automatización que se está generando, es necesario importar en el mismo el hardware de cada componente mecatrónico, paso 4 de la Figura 5.

TIA Portal Openness dispone de funciones que permite importar hardware almacenado en librerías TIA Portal al proyecto de automatización generado.

El operador configurará el hardware y las comunicaciones de forma manual en el entorno TIA Portal. La información necesaria para realizar esta configuración la genera la aplicación, a partir del proyecto generado, en un fichero PDF. Corresponde al paso 5 de la Figura 5.

Una vez completados los pasos anteriormente indicados se tendrá el proyecto completo generado en TIA Portal. Quedaría por último la compilación del mismo y la carga en el PLC, paso 6 de la Figura 5.

4. Caso de estudio



Figura 12 Diagrama funcional caso de estudio "Test de fugas"

El caso de estudio se ha desarrollado para la generación del proyecto de automatización de una máquina de testeo de fugas, utilizada en la fabricación de bloques y culatas de motores de combustión en el sector del automóvil, con la estructura de la Figura 12.

Aunque este tipo de máquinas pueden tener diferente formas constructivas, en muchos casos la máquina está formada por un plato giratorio, con varias posiciones (3 o 4), en las que se realizan las operaciones sobre las piezas. Estas máquinas pueden estar varias juntas formando una línea de procesando de piezas, iguales o diferentes, en un sistema de producción general, o pueden estar insertadas en una línea de producción con otras máquinas que realizan otras operaciones sobre el producto que se está fabricando. La máquina consta de los elementos componentes mecatrónicos siguientes.

Plato divisor (Bastidor): Es un plato giratorio de 3 posiciones desfasadas 120°, accionado por un servo-accionamiento eléctrico en posición, que dispone de señales E/S analógicas y digitales y tiene un FB asociado de control. En una posición se realiza la carga y descarga de las piezas, en la segunda posición se realiza el test del circuito de agua y en la tercera posición se realiza el test del circuito de aceite.

Cilindro hidráulico (Operación): El cilindro hidráulico eleva la pieza hasta la posición donde se encuentra un bloque mecánico, sobre el que se encuentran los sensores y actuadores del “sistema de inyección de aire y registro de valores”. Tiene un dispositivo IO con un FB para su control, por cada pieza y por cada estación de la máquina.

Sistema de inyección de aire y registro (Operación): Este sistema consta de sensores de medida y actuadores y dispone de un sistema de control propio que realiza el control del testeo sobre la pieza. Dispone de un FB por cada tipo de pieza y por estación. La comunicación con el PLC es en Profinet

Transporte: la maquina utilizada como caso de estudio no tiene transporte.

Sistema de alimentación: La alimentación de la máquina se hace de forma manual. Las señales están conectadas a un dispositivo I/O y se procesan mediante un FB.

Interfaz de operador (HMI): La máquina dispone de un interfaz de operador HMI desde donde se puede dar órdenes al sistema de control.

Botonera (Botonera): La máquina dispone de un conjunto de pulsadores y dispositivos de puesta en marcha y paros de la máquina. Las señales

implicadas se controlan mediante un FB de control de señalizaciones y se capturan y transmiten a través de un dispositivo I/O.

La Figura 13 presenta la estructura del proyecto generado, que como se puede observar sigue la estructura del modelo funcional de la Figura 3.

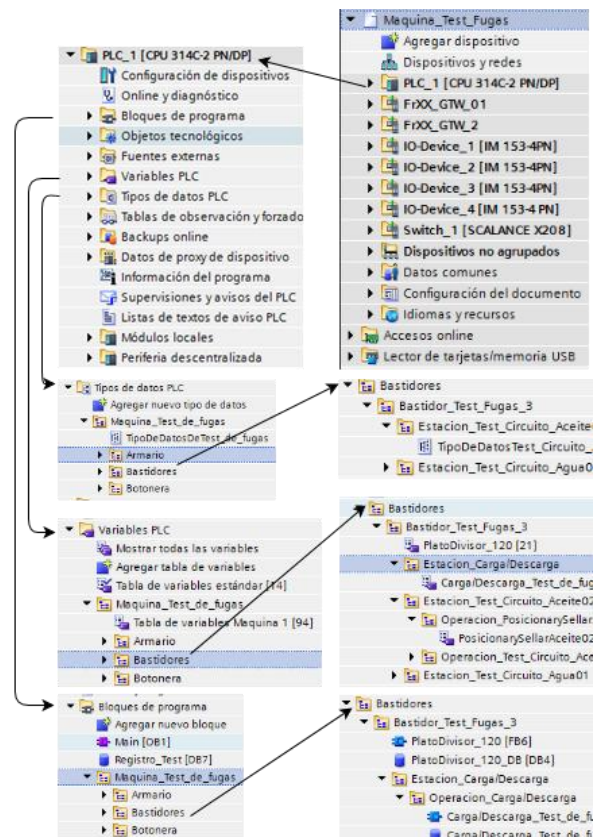


Figura 13 Resultado generación de código en TIA Portal

5. Conclusiones y trabajos futuros

La arquitectura desarrollada y descrita en este artículo permite generar proyectos de automatización de máquinas modulares a partir de proyectos tipo de forma automática, evitando todos los inconvenientes que presenta hacerlo de forma manual. Con lo que se consigue un mayor grado de reutilización de los desarrollos realizados.

Para poder utilizar esta arquitectura es necesario un diseño modular de todos los proyectos tipo de la máquina desde su concepción.

Es una arquitectura abierta sobre la que siempre se pondrán añadir proyectos tipo básicos que se pueden ir desarrollando para futuras máquinas. Este desarrollo se realiza una única vez y se puede utilizar en muchas máquinas.

La arquitectura desarrollada es fuertemente dependiente de:

- Plataforma en la que se va a generar el proyecto de automatización en este caso TIA Portal
- El meta-modelo de las máquinas que construye cada empresa.

En un principio se ha definido una arquitectura que contempla el nivel máquina, pero esta arquitectura podría ampliarse añadiendo mas niveles, como podría ser la línea completa de un proceso de fabricación.

Agradecimientos

Este trabajo se ha financiado en parte bajo el Proyecto DPI2015-68602-R (MINECO/FEDER, UE), por la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) con el proyecto PPG17/56, y por el Gobierno Vasco (GV/EJ) bajo el reconocido grupo de investigación IT914-16.

Referencias

- [1] B. Prasad, "Analysis of pricing strategies for new product introduction," *Pricing Strateg. Pract.*, vol. 5, no. 4, pp. 132–141, 1997.
- [2] Plattform Industrie 4.0, "What is Industrie 4.0?," pp. 4–5, 2017.
- [3] K. Ulrich, "Fundamentals of product modularity," in *Management of Design*, Springer, 1994, pp. 219–231.
- [4] C. Maga, N. Jazdi, and P. Göhner, "Reusable models in industrial automation: experiences in defining appropriate levels of granularity," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 44, no. 1, pp. 9145–9150, 2011.
- [5] R. Priego, A. Armentia, E. Estévez, D. Orive, N. Iriondo, and M. Marcos, "Implementación de mde para la generación de sistemas de automatización reconfigurables," *XXXVI Jornadas de Automática*, pp. 166–173, 2015.
- [6] B. Vogel-Heuser, A. Fay, I. Schaefer, and M. Tichy, "Evolution of software in automated production systems: Challenges and research directions," *J. Syst. Softw.*, vol. 110, pp. 54–84, 2015.
- [7] S. Feldmann and B. Vogel-Heuser, "Interdisciplinary product lines to support the engineering in the machine manufacturing domain," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 55, no. 13, pp. 3701–3714, Jul. 2017.
- [8] E. Estévez, M. Marcos, and D. Orive, "Automatic generation of PLC automation projects from component-based models," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 35, no. 5–6, pp. 527–540, 2007.
- [9] E. Siegel and A. Retter, *eXist A NoSQL Document Database and Application Platform*. O'Reilly Media, 2014.

DDS en el desarrollo de sistemas distribuidos heterogéneos con soporte para criticidad mixta

Héctor Pérez Tijero y J. Javier Gutiérrez

*Grupo de Ingeniería Software y Tiempo Real, Universidad de Cantabria, 39005-Santander, SPAIN
{perezh, gutierjj}@unican.es*

Resumen

El uso de middleware de distribución facilita la programación de sistemas distribuidos heterogéneos, y por extensión también puede facilitar la generación automática de código como parte de una estrategia de desarrollo basada en modelos. Sin embargo, este middleware presenta una complejidad añadida que dificulta su uso en sistemas con ciertos requisitos de criticidad o de tiempo real. En este trabajo se hace una revisión de algunos estudios previos en los que se muestra la posibilidad de utilizar un middleware de distribución centrado en los datos (DDS, Data Distribution Service) para la integración de aplicaciones con criticidad mixta en sistemas distribuidos.

Palabras clave: Tiempo real, DDS, sistemas particionados, hipervisor, flujo e2e

1. Introducción

Durante las últimas décadas, los sistemas industriales de tiempo real han pasado de ejecutar aplicaciones cerradas en sistemas empotrados y de propósito muy específico a formar parte de entornos de ejecución potentes, abiertos e interconectados. Sin embargo, el incremento de potencia ha dejado de estar asociado a la velocidad de los procesadores, y en la actualidad está ligado a la presencia de un mayor número de *cores* o núcleos. A medida que los sistemas multicore van penetrando en la industria, se busca integrar cada vez más funcionalidad en un único sistema. Así, resulta habitual encontrarse con sistemas que deben satisfacer simultáneamente una combinación de requisitos no funcionales, relacionados por ejemplo con la seguridad, la integridad, los tiempos de respuesta o incluso el consumo energético. La aplicación de técnicas de virtualización resulta fundamental en este contexto, ya que habilitan la ejecución de aplicaciones heterogéneas en una misma plataforma computacional.

Dentro de las técnicas de virtualización, el particionamiento del sistema proporciona un entorno de ejecución integrado donde las aplicaciones están aisladas temporal y espacialmente, permitiendo la coexistencia de aplicaciones con distintos niveles de criticidad. Estas técnicas son habituales en sistemas que tienen que pasar por un proceso de certificación para comprobar que cumplen las

garantías necesarias establecidas por los estándares de certificación de cada sector industrial. Un ejemplo representativo de particionado en el campo de la aviónica es el propuesto por el estándar ARINC 653 [1].

Aunque el particionado puede ser implementado de diferentes formas [2], las técnicas de particionado basadas en un hipervisor son especialmente relevantes ya que permiten la ejecución de varios sistemas operativos independientes, lo que abre la posibilidad de integrar software empaquetado (COTS) en sistemas particionados.

En general, el particionamiento es utilizado principalmente en los sistemas críticos como pueden ser los de aviónica, aunque se está empezando a aplicar a otros sectores como el energético [3], la automoción [4] o el control industrial [5]. En este contexto, el uso de middleware basado en estándares de distribución puede resultar especialmente atractivo por sus características de interoperabilidad, abstracción de servicios de red o gestión transparente de las comunicaciones.

En la actualidad, uno de los estándares de distribución que más difusión está teniendo es DDS (*Data Distribution Service for Real-Time Systems*) [6], el cual está diseñado explícitamente para el desarrollo de aplicaciones de tiempo real. Uno de los objetivos principales de DDS es facilitar la integración de aplicaciones con independencia del lenguaje de programación o del sistema operativo. Por otro lado, el estándar también define un protocolo denominado DDSI-RTPS [7] para garantizar la interoperabilidad entre implementaciones.

Las características multiplataforma y multilenguaje de DDS, junto con su protocolo de interoperabilidad, resultan especialmente relevantes en sistemas heterogéneos como los que se encuentran habitualmente en los sistemas particionados. Así, en este artículo se muestra el papel que puede jugar la integración de DDS en los sistemas particionados para posibilitar el desarrollo de sistemas distribuidos en los que se pueden combinar aplicaciones críticas o con requisitos de tiempo real, con otras que no tienen restricciones de ejecución o éstas son más laxas. Para ello, se realiza una compilación de las ideas y resultados más relevantes mostrados en diferentes trabajos previos [8][9][10][11][12].

El documento está organizado de la siguiente manera. El apartado 2 está dedicado a presentar las características básicas del middleware de distribución DDS y de los sis-

temas particionados. En el apartado 3 se explora el modelado de DDS para el análisis de tiempo real. La propuesta de una arquitectura para sistemas particionados y distribuidos con DDS se realiza en el apartado 4, mientras que el apartado 5 presenta el desarrollo de una plataforma basada en la arquitectura propuesta. Finalmente, el apartado 6 plantea las conclusiones y el trabajo futuro.

2. DDS y sistemas particionados

2.1. Data Distribution Service

DDS es un estándar de distribución desarrollado por la OMG [6]. Está basado en un paradigma de comunicación denominado editor-suscriptor en el que el middleware se centra en la obtención de datos, trasladando a un segundo plano cuál es el origen de éstos. Las aplicaciones que siguen este modelo forman un sistema distribuido en el que los nodos procesadores se comunican entre sí enviando (los editores) y recibiendo (los suscriptores) datos de forma anónima, tal y como se ilustra en la Figura 1. DDS introduce el concepto de espacio global de datos virtual, en el que el flujo de información puede originarse en uno o varios editores y tener como destino uno o varios suscriptores.

La comunicación entre editores y suscriptores se lleva a cabo a través de la definición del tipo de dato a compartir (*topic*) por parte de los editores. Por su parte, los suscriptores registrarán en el sistema su interés por recibir determinados *topics*, siendo el propio middleware el encargado de hacer posible la comunicación de forma automática y transparente. El modelo propuesto se caracteriza por estar débilmente acoplado, pues tanto editores como suscriptores están desacoplados respecto al tiempo (los datos producidos pueden ser almacenados para un uso posterior) y al espacio (editores y suscriptores no se conocen mutuamente).

Por defecto, el servicio de descubrimiento o localización de entidades definido por DDS es dinámico, esto es, los participantes pueden incorporarse o abandonar el sistema de forma transparente al usuario. Con este fin, el middleware intercambia internamente información sobre la presencia y características de todas las entidades del sistema distribuido, generando un tráfico de red adicional que se conoce como metatráfico.

Además de definir el modelo de distribución, la especificación del DDS también contempla la configuración de distintos aspectos no funcionales del sistema distribuido a través de los parámetros de calidad de servicio (QoS). Estos parámetros permiten configurar, por ejemplo, la disponibilidad o el plazo temporal de recepción de datos.

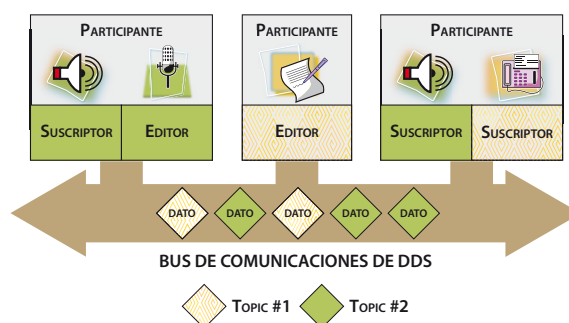


Figura 1 Distribución con DDS

Otro aspecto relevante de DDS para los sistemas de tiempo real son sus mecanismos de tolerancia a fallos. Éstos se basan en la redundancia de editores y/o suscriptores que son gestionados de forma transparente al usuario por parte del middleware.

2.2. Particionado de sistemas

Una partición representa un entorno de ejecución de aplicaciones protegido mediante técnicas de aislamiento y contención de fallos. Por un lado, las técnicas de aislamiento espacial buscan proteger los espacios de memoria asignados exclusivamente a cada partición. Por otro, el aislamiento temporal tiene por objeto garantizar intervalos de ejecución libres de interferencias para cada partición. Habitualmente, este tipo de aislamiento se implementa a través de una planificación estática que asigna a cada partición uno o varias ventanas temporales para su ejecución. Cuando el particionado se realiza a través de un hipervisor, cada partición puede ejecutar un sistema operativo independiente y por tanto existe un segundo nivel de planificación para los hilos o threads de las particiones.

Una de las tareas fundamentales del hipervisor consiste en virtualizar los recursos del sistema (por ejemplo, relojes, temporizadores, interrupciones, etc), así como los núcleos disponibles cuando se trata de un sistema multicore. Aunque existen técnicas de virtualización que no requieren modificar el sistema operativo, su elevada sobrecarga dificulta su uso en sistemas de tiempo real. En este contexto, las técnicas de para-virtualización son más habituales y requieren modificar el sistema operativo para que acceda a los recursos del sistema a través de los servicios proporcionados por el hipervisor.

En los sistemas particionados con ARINC 653, la comunicación entre particiones se lleva a cabo mediante el intercambio de mensajes a través de canales de comunicación. Un canal conecta un único puerto de envío con uno o varios puertos de recepción. Dado que las comunicaciones de un sistema particionado deben estar supervisadas y autorizadas por el hipervisor, la configuración de todos sus parámetros (canales, puertos y sus correspondientes atributos) deben realizarse estáticamente.

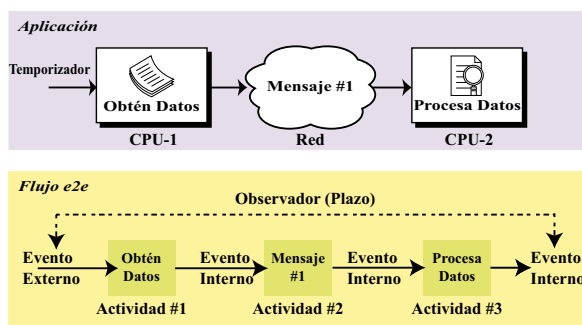


Figura 2 Modelo de tiempo real

Por último, la asignación de los recursos a particiones se realiza de forma estática, normalmente a través de un fichero de configuración. La definición de partición en la configuración se caracteriza por sus áreas de memoria, puertos de comunicaciones y requisitos temporales, así como cualquier otro recurso necesario para su ejecución. Esta asignación estática de recursos es el mecanismo básico para garantizar el determinismo y la seguridad en un sistema particionado.

3. Modelado de DDS para el análisis de tiempo real

En este apartado se analiza el estándar DDS para extraer el modelo que permite la aplicación de técnicas de cálculo de tiempos de respuesta.

3.1. Modelo de tiempo real

Un sistema de tiempo real se puede modelar como un conjunto de transacciones o flujos e2e (*end-to-end flows*) que representan un conjunto de tareas y mensajes en los que existen relaciones de precedencia en su ejecución, tal y como se ilustra en la Figura 2. Cada flujo e2e se activa por la llegada de uno o más eventos externos que generan la ejecución de actividades (por ejemplo, la ejecución de un trozo de código en el procesador o el envío de un mensaje por la red en la Figura 2). Estas actividades a su vez generan eventos que son internos al flujo e2e y que pueden activar a otras actividades del mismo, pudiendo tener cada uno de estos eventos requisitos temporales asociados.

Este modelo se ha utilizado tradicionalmente en el cálculo de los tiempos de respuesta de peor caso tanto en sistemas monoprocesadores como en sistemas distribuidos. Actualmente, este modelo forma parte del estándar de modelado MARTE [13] y puede ser utilizado en procesos de desarrollo dirigido por modelos (MDE) [14].

3.2. Modelado de las características de tiempo real

Aunque DDS está orientado al desarrollo de aplicaciones distribuidas de tiempo real, existen ciertos aspectos que el estándar no aborda y que podrían comprometer los tiempos de respuesta de la aplicación. Por ejemplo, la configuración de los parámetros de planifi-

cación de todas las entidades planificables en el sistema (esto es, threads y mensajes), o cotas en la influencia del metatráfico sobre el resto del sistema.

De acuerdo al trabajo presentado en [8], el modelo de distribución propuesto por DDS es adecuado para aplicar las técnicas de análisis de planificabilidad tradicionales sobre sistemas gobernados por eventos. De hecho, el modelo propuesto por DDS facilita la transición entre el modelo teórico de tiempo real definido en MARTE y el sistema físico. Esto se debe principalmente a que las características de desacople de DDS proporcionan flexibilidad a la hora de implementar un sistema distribuido, independientemente de la naturaleza síncrona o asíncrona de sus flujos e2e.

3.3. Modelado de los parámetros de QoS

Otra de las características relevantes de DDS es la configuración de los aspectos no funcionales a través de los parámetros de QoS. El uso de estos parámetros puede influir en el comportamiento temporal de la aplicación [15], por lo que resulta necesario explorar si las políticas de QoS definidas en el estándar pueden representarse mediante el modelo de tiempo real [9]. En general, la mayoría de los parámetros de QoS puede modelarse utilizando las relaciones de precedencia de los flujos e2e (lineales o no lineales). En otros casos, el modelado depende de la implementación a utilizar.

Por otro lado, algunos de los parámetros de QoS restringen las relaciones de precedencia que componen el flujo e2e. Por ejemplo, algunos parámetros de QoS pueden provocar el descarte de ciertas muestras de datos, con lo que los flujos e2e que utilicen estas políticas no podrían construirse siguiendo el ejemplo de la Figura 2. En ese caso, habría que utilizar un modelo desacoplado formado por varios flujos e2e independientes, y calcular el tiempo de respuesta de peor caso de principio-a-fin como la suma de los tiempos de respuesta de cada flujo e2e. Esta circunstancia puede influir en las técnicas de análisis de planificabilidad que pueden aplicarse en cada caso particular.

Además de verificar los tiempos de respuesta de peor caso del sistema distribuido, es importante resaltar que el uso de técnicas de modelado facilita también la integración del middleware de distribución en los procesos de desarrollo dirigidos por modelos.

4. Arquitectura de sistema distribuido: DDS sobre particiones ARINC 653

Aunque un hipervisor proporciona servicios propios para la comunicación entre particiones, el uso de un estándar de distribución facilitaría la interoperabilidad entre sistemas heterogéneos, así como el desarrollo de aplicaciones independientemente del lenguaje de programación, las redes subyacentes o la ubicación física. Si nos centramos en el paradigma de distribu-

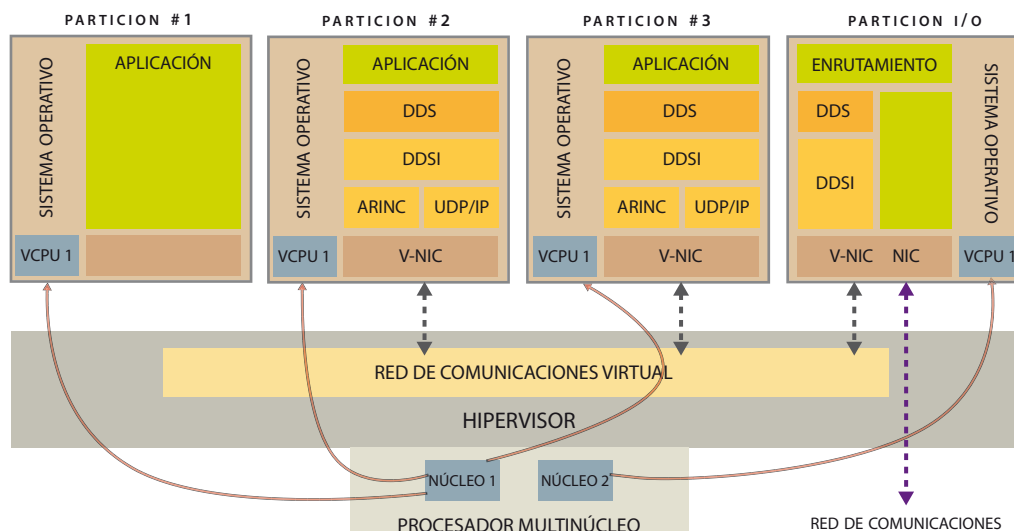


Figura 3. Arquitectura del sistema: nodo procesador multicore

ción, tanto DDS como ARINC 653 proporcionan servicios similares basados en comunicaciones débilmente acopladas y esencialmente asíncronas.

La Figura 3 muestra un ejemplo de la arquitectura del sistema que incluye un hipervisor sobre un procesador multicore con cuatro particiones con sistemas operativos independientes. En la arquitectura propuesta, las comunicaciones se realizan a través de DDS y, por tanto, cada partición que requiera comunicarse ejecutará una instancia del middleware (por ejemplo, las particiones 2 y 3 de la Figura 3). Para establecer con éxito esta comunicación, la plataforma virtualizada debe proporcionar unos recursos adicionales a modo de infraestructura de comunicaciones virtual. Esta infraestructura está compuesta por: (1) una interfaz de red virtual por cada partición, (2) una red virtual de comunicaciones para interconectar las particiones y (3) un mecanismo de acceso seguro a la interfaz de red física.

4.1. Infraestructura de comunicaciones

La interfaz de red virtual o V-NIC (ver Figura 3) proporciona una interfaz de red homogénea a las particiones, independientemente de si éstas tienen o no acceso al dispositivo de red. Esta abstracción se implementa en el nivel del sistema operativo y proporciona las funcionalidades básicas de una interfaz de red como son el envío y la recepción de mensajes. Además, es responsable de crear los puertos de comunicaciones que sirven de punto de acceso a los servicios de comunicaciones ofrecidos por el hipervisor. Por tanto, la V-NIC constituye la entidad fundamental para que el middleware de distribución pueda ejecutarse sin modificaciones en su arquitectura.

La transmisión de mensajes entre particiones se realiza a través de la red virtual de comunicaciones. Esta entidad representa una red lógica que interconecta las particiones locales a un nodo, tal y como se muestra en

la Figura 3. La red virtual se implementa en el nivel del hipervisor, el cual gestiona qué comunicaciones están permitidas y cuáles son sus características (por ejemplo, el tamaño máximo de los mensajes intercambiados).

Dependiendo de la criticidad de las particiones, la red virtual puede implementarse utilizando diferentes mecanismos de comunicación, como áreas de memoria compartida entre particiones o canales de comunicación gestionados internamente por el hipervisor. Asimismo, la red virtual del hipervisor debe proporcionar soporte para la notificación de los eventos relacionados con la comunicación (por ejemplo, la llegada de un nuevo mensaje).

Cuando las comunicaciones son entre particiones pertenecientes al mismo nodo, los mecanismos descritos hasta ahora son suficientes para el intercambio de información. Sin embargo, cuando las particiones se encuentran en diferentes nodos es necesario controlar además el acceso al dispositivo de red, ya que varias particiones pueden intentar acceder simultáneamente a él. La implementación de un acceso seguro puede realizarse a nivel del hipervisor o a nivel de partición. En el primer caso, se incrementa la complejidad y el tamaño del hipervisor, lo que hace que su código sea más difícil de verificar y certificar. En el segundo caso, el acceso al recurso de red compartido se controla a través de una partición especial denominada partición de entrada/salida o partición de I/O, tal y como se muestra en la Figura 3. Esta partición tiene acceso exclusivo a la interfaz de red y actúa como intermediario entre el origen del mensaje y su destino.

4.2. Middleware de distribución

Como ya se ha comentado, las similitudes entre los modelos de distribución propuestos por las especificaciones DDS y ARINC 653 facilitan la integración de ambos. Esta integración puede realizarse tanto a nivel

de hipervisor como a nivel de partición [11]. En el primer caso, DDS implementaría el servicio de comunicaciones del hipervisor y por tanto, se utilizaría como un bus de comunicaciones y protocolo de interoperabilidad. Sin embargo, integrar DDS a nivel de partición es una opción más flexible ya que abre la posibilidad de utilizar además las políticas de QoS definidas por el estándar. La Figura 3 muestra esta segunda opción en la que una instancia del middleware DDS se ejecuta en cada partición que requiera comunicaciones. Al mismo tiempo, el middleware puede integrarse en la partición de dos formas distintas: (1) mediante una implementación estándar de DDS que se comunica a través de la pila de protocolos UDP/IP [10]; y (2) a través de una implementación certificable de DDS, en la que parte de la funcionalidad de DDS puede estar restringida y los protocolos de comunicaciones pueden estar basados directamente en los servicios de comunicaciones del hipervisor [12] (por ejemplo, las comunicaciones ARINC 653).

En general, la partición de I/O no ejecutará ninguna instancia del middleware de distribución ya que su función se reduce a redireccionar los mensajes recibidos. Sin embargo, en sistemas no críticos también puede ser una opción ejecutar una instancia del middleware en la partición de I/O [10].

5. Claves de la integración DDS/ARINC 653

Aunque como ya se ha dicho, el modelo de distribución de DDS es similar al propuesto por el servicio de comunicaciones de los sistemas particionados con ARINC 653, existen diferencias entre ambos estándares que pueden comprometer la integración de ambas tecnologías, tal y como se describe a continuación.

5.1. Retos en la integración de tecnologías

El modelo de distribución definido por DDS soporta las interacciones uno-a-uno, uno-a-muchos y muchos-a-uno. Sin embargo, la interacción muchos-a-uno suele estar restringida en sistemas particionados para minimizar el riesgo de pérdida de mensajes [16].

En general, la interacción muchos-a-uno es habitual en los sistemas distribuidos tradicionales. Por ejemplo, el middleware suele abrir un puerto de comunicación pre-configurado y público donde puedan contactar los nuevos participantes. Además, en el caso de DDS, la interacción muchos-a-uno es un elemento fundamental para su servicio de tolerancia a fallos basado en la redundancia de editores. Para solventar este problema de integración, se propone soportar este tipo de interacción en el nivel del protocolo DDSI-RTPS, tal y como se ilustra en la Figura 4.

El tamaño de los mensajes intercambiados entre las particiones puede ser variable, pero debe ser acotado para mantener el determinismo del sistema. De

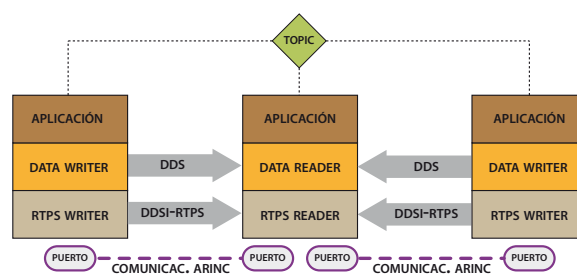


Figura 4 Interacción muchos-a-uno en sistemas particionados con DDS

acuerdo al estándar, el tamaño de los mensajes de DDS no está acotado ya que pueden incluir tanto datos de usuario como internos al protocolo (metatráfico). Por tanto, las implementaciones de DDS para sistemas particionados deberían permitir la configuración del tamaño máximo de los mensajes.

5.2. Características de las comunicaciones

La duración y asignación de ventanas temporales a particiones representa un aspecto clave en el diseño de sistemas particionados. En concreto, resulta especialmente relevante la configuración elegida para la partición de I/O, ya que actúa como intermediaria en todas las comunicaciones con el exterior. Por tanto, esta partición debería ejecutarse con regularidad suficiente para que las particiones puedan recibir/enviar sus mensajes de acuerdo a sus plazos temporales. Al mismo tiempo, la ejecución regular de esta partición limita la ejecución del resto de particiones y puede llegar a penalizar ampliamente su rendimiento [10]. Una opción para mitigar este problema viene dada por el uso de un procesador multicore en el que uno de los núcleos sea asignado a la partición de I/O [11].

Como contrapartida, el uso de procesadores multicore incrementa la complejidad en la gestión de las interrupciones. En un procesador con un solo núcleo, las particiones procesan las interrupciones al comienzo de su ejecución. Así, una interrupción de red se genera en la recepción de un mensaje, pero no se procesa hasta que entre en ejecución la partición de I/O. Una vez en ejecución, la partición de I/O redireccionará el mensaje y la correspondiente interrupción a la partición de destino. Por el contrario, un procesador multicore permite que la partición de I/O y la partición de destino del mensaje puedan estar en ejecución al mismo tiempo y, por tanto, que puedan interferirse durante su ventana de ejecución. Desde la perspectiva del rendimiento del sistema, resulta interesante que el mensaje pueda ser entregado tan pronto como se haya recibido. Para ello, es necesario incorporar mecanismos que permitan notificar la llegada de nuevos mensajes entre particiones (por ejemplo, interrupciones entre núcleos). Sin embargo, desde la perspectiva de la seguridad del sistema, es necesario que el hipervisor

también proporcione mecanismos de protección ante ráfagas incontroladas de interrupciones.

Además de la comunicación basada en paso de mensajes, algunos sistemas particionados permiten el uso de memoria compartida para comunicar particiones que requieran un mayor ancho de banda [4][10]. En este caso, el concepto de aislamiento espacial debe interpretarse de una forma más laxa, esto es, desde el punto de vista de la configuración estática del sistema, el hipervisor supervisa qué áreas de memoria son compartidas y sólo permite el acceso a las particiones autorizadas previamente.

5.3. Análisis de planificabilidad

La arquitectura propuesta en el apartado 4 puede beneficiarse del uso de técnicas de análisis de tiempos de respuesta de peor caso para verificar los plazos temporales del sistema distribuido particionado. Para ello, es necesario que estas técnicas tengan en cuenta las características de los sistemas distribuidos con DDS [8] [9], y también las de los sistemas particionados con ARINC 653. Para estos últimos, se pueden usar técnicas compatibles con sistemas gobernados por eventos tanto en los procesadores [17] como en las redes de comunicaciones [18].

6. Desarrollo de una plataforma distribuida

Este apartado describe la implementación de una plataforma distribuida de tiempo real que responde a la arquitectura presentada. Esta plataforma está basada en la implementación de DDS denominada RTI Connex Micro [19] que se ejecuta sobre el sistema operativo de tiempo real MaRTE OS [20], y que a su vez se ejecuta sobre el hipervisor XtratuM [21]. El desarrollo de esta plataforma se ha centrado en validar la arquitectura propuesta en el apartado 4. En concreto, la plataforma proporciona soporte para las siguientes características descritas en la Figura 3:

- La red de comunicaciones virtual está basada en el servicio de comunicaciones definido en ARINC 653, que en la plataforma está proporcionado por el hipervisor XtratuM.
- La interfaz de red virtual se ha implementado como un *driver* de MaRTE OS que proporciona una funcionalidad similar a los *drivers* de los dispositivos de red.
- La comunicación entre las particiones por medio de DDS se realiza por medio del protocolo de interoperabilidad DDSI-RTPS. En la plataforma, este protocolo se puede ejecutar sobre dos niveles de transporte diferentes: un transporte basado en la pila de protocolos UDP/IP, que es el definido por defecto en el estándar, y un transporte basado en el servicio de comunicaciones de ARINC 653.

La integración de estas tecnologías en la plataforma no puede realizarse directamente y requiere implementar un conjunto de extensiones que se describen brevemente a continuación.

6.1. Extensiones a la implementación de DDS

RTI Connex Micro [19] es un middleware de distribución que sigue el estándar DDS y que está especialmente orientado a sistemas empujados y/o certificables. Este middleware está diseñado para ser multiplataforma e integrar diferentes redes de comunicaciones. Para ello, implementa dos capas de abstracción de los servicios que debe proporcionar el sistema operativo y las comunicaciones subyacentes. Aunque algunos de los servicios requeridos por el middleware de distribución se proporcionan de forma virtualizada por el hipervisor, uno de nuestros objetivos es el uso de COTS, por lo que el middleware debe acceder a estos servicios a través de una interfaz estándar del sistema operativo como POSIX. En concreto, la adaptación del middleware a la plataforma requiere implementar las siguientes funcionalidades:

- *Servicios del sistema operativo.* Se ha desarrollado una capa de adaptación de los servicios proporcionados por MaRTE OS, incluyendo gestión de memoria, concurrencia, sincronización, gestión del tiempo y registro de eventos.
- *Servicios de red.* Se han añadido los servicios generales de gestión y registro de las interfaces de red existentes en el sistema. Además, la incorporación de un nuevo transporte basado en ARINC 653 requiere implementar dos capas de software adicionales: (1) una capa para las operaciones de alto nivel requeridas por el middleware (por ejemplo, operaciones para enviar/recibir mensajes DDSI-RTPS, creación de threads para operaciones de I/O, la gestión de los recursos de red, etc.), y (2) otra capa para interactuar directamente con el servicio de comunicaciones ARINC 653 y la interfaz de red virtual proporcionada por el sistema operativo.
- *Servicios de localización de entidades.* Un nuevo mecanismo para gestionar la información relacionada con la ubicación de las particiones y la forma de contactar con ellas.

6.2. Extensiones al sistema operativo de tiempo real

El sistema operativo utilizado en la plataforma es MaRTE OS [20], un *kernel* que proporciona la funcionalidad de la norma POSIX.13 [22] para plataformas empujadas de tiempo real.

En un sistema particionado como el propuesto, el hipervisor XtratuM es el encargado de gestionar todo el hardware de la plataforma. Para facilitar el acceso de las particiones a estos recursos, XtratuM proporciona una interfaz de acceso al hardware. Por tanto, los

sistemas operativos de las particiones no pueden acceder al hardware de forma nativa, sino que deben ser modificados para utilizar esta interfaz. En el caso de MaRTE OS, el *kernel* proporciona una capa de abstracción de bajo nivel para acceder al hardware, por lo que la adaptación se ha centrado en modificar esa capa de bajo nivel a la interfaz proporcionada por el hipervisor [23]. En concreto, se han realizado las siguientes modificaciones:

- *Adaptación al modelo de interrupciones virtualizadas.* Dado que el manejo de interrupciones corresponde al hipervisor, el sistema operativo debe adaptarse con objeto de utilizar las operaciones proporcionadas por el hipervisor para acceder a las interrupciones virtualizadas equivalentes, así como al resto de interrupciones internas al hipervisor que son propias de un sistema particionado. Además, el sistema operativo debe configurarse para atender exclusivamente las interrupciones autorizadas por el hipervisor para cada partición.
- *Integración de interfaces de red virtualizadas.* Para proporcionar acceso a los servicios de comunicaciones de XtratuM, se ha implementado la interfaz de red virtual en MaRTE OS. Esta entidad se ha implementado como un *driver* del sistema operativo que proporciona a las aplicaciones una interfaz estándar POSIX para acceder al dispositivo virtual (*open*, *close*, *read*, *write* e *ioctl*). La interfaz de red virtual es responsable de crear y configurar los puertos de comunicación establecidos en la configuración de la partición, así como de proporcionar una funcionalidad similar a la de la interfaz física de red. Dado que los servicios de comunicación proporcionados por XtratuM son no bloqueantes, otro aspecto a implementar ha sido un mecanismo bloqueante para la recepción de mensajes. Este mecanismo se basa en la gestión de interrupciones internas del hipervisor para notificar la entrega de mensajes a las particiones.
- *Uso de servicios virtualizados para la gestión del tiempo.* XtratuM proporciona relojes y temporizadores para la gestión del tiempo en las particiones. Así, los relojes y temporizadores de propósito general proporcionados por el sistema operativo, junto con otros servicios avanzados (por ejemplo, los relojes de tiempo de ejecución) deben implementarse utilizando los recursos virtuales proporcionados por XtratuM.
- *Integración en el proceso de desarrollo.* Una vez que la configuración del sistema particionado ha sido validada, el proceso de desarrollo genera un contenedor software que integra el gestor de arranque, las particiones y el hipervisor. Por tanto, el entorno de compilación cruzada de MaRTE OS debe integrarse dentro de ese proceso de desarrollo.

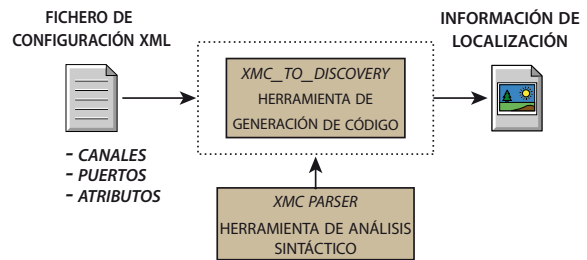


Figura 5 Generación automática de la información de localización de entidades para DDS

6.3. Extensiones al hipervisor

XtratuM es un hipervisor especialmente diseñado para sistemas empujados de tiempo real [21]. El servicio de comunicaciones implementado por XtratuM está basado en la especificación ARINC 653, pero sólo proporciona soporte para la comunicación entre particiones ubicadas en el mismo nodo procesador, es decir, que no requieren el uso de la red de comunicaciones. Por tanto, resulta necesario extender la configuración del hipervisor para indicar si las particiones van a ejecutarse o no en el mismo nodo [12]. Además, DDS requiere acceder a esta información de configuración para ejecutar su servicio de localización de entidades. En concreto, la integración del hipervisor en la plataforma distribuida ha requerido las siguientes extensiones:

- *Identificación del nodo en las comunicaciones.* Cada instancia del hipervisor puede ser identificada mediante la incorporación de un identificador al fichero de configuración. Dado que los canales de comunicación están definidos a nivel de sistema y no de partición, este identificador está también vinculado a los puertos de comunicación.
- *Generación automática de la información de contacto de las particiones para DDS.* Tal y como se ilustra en la Figura 5, se ha desarrollado una nueva herramienta *xmc_to_discovery* que genera la información que requiere DDS a partir del fichero de configuración de XtratuM.

7. Conclusiones y trabajo futuro

En este trabajo se ha explorado el modelado de tiempo real de aplicaciones distribuidas con DDS. Aunque DDS está orientado al diseño de aplicaciones distribuidas de tiempo real, quedan ciertos aspectos relevantes por concretar en el estándar y que por tanto quedan abiertos a la implementación.

Además, se ha analizado su integración en sistemas particionados con ARINC 653. Dado que uno de los principales inconvenientes de los sistemas distribuidos particionados es el cuello de botella en el uso de las comunicaciones, se ha propuesto una arquitectura distribuida utilizando un nodo multiprocesador, en el que

uno de los núcleos está dedicado a gestionar la interfaz de red. Por último, se ha presentado un desarrollo concreto de la plataforma distribuida de acuerdo con la arquitectura propuesta.

Con el incremento de la conectividad de los sistemas, uno de los aspectos que más preocupa en la actualidad es la seguridad de los sistemas. Por ello, resultaría interesante explorar la seguridad de la plataforma propuesta desde la perspectiva del middleware y del hipervisor. Por otro lado, nuestro trabajo continúa en la línea de los sistemas críticos mediante la integración de redes de comunicaciones especializadas como AFDX.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado en parte por el Gobierno de España en el proyecto TIN2014-56158-C4-2-P (M2C2).

Referencias

- [1] Airlines Electronic Engineering Committee, Aeronautical Radio INC. "Avionics Application Software Interface, required Services". ARINC Specification 653-1. 2010.
- [2] S. Han y H. Jin. "Resource partitioning for Integrated Modular Avionics: comparative study of implementation alternatives". *Software: Practice and Experience (SPE)*, <http://dx.doi.org/10.1002/spe.2210>. 2014.
- [3] J. Pérez, D. González, S. Trujillo, T. Trapman y J. M. Garate. "A Safety Concept For A Wind Power Mixed-Criticality Embedded System Based On Multicore Partitioning", *Proc. of the 1st Int. Workshop on Mixed Criticality Systems*, Vancouver (Canada), 2013.
- [4] Open VEHiculaR SEcurE platform (OVERSEE) European Project, 7th Framework Prog., <https://www.oversee-project.com>, 2013.
- [5] Open and cost-effective virtualization techniques and supporting separation kernel for the embedded systems industry (VOS4ES) European Project, 7th Framework Prog., http://cordis.europa.eu/project/rcn/100889_en.html, 2013.
- [6] Object Management Group. Data Distribution Service for Real-time Systems. v1.4, formal/15-04-10, 2015.
- [7] Object Management Group. The Real-time Publish-Subscribe Wire Protocol. DDS Interoperability Wire Protocol Specification. v2.2, formal/2014-09-01, 2014.
- [8] H. Pérez y J. J. Gutiérrez, "On the schedulability of a data-centric real-time distribution middleware", *Computer Standards and Interfaces*, Elsevier, Volume 34, Issue 1, págs. 203–211, 2012.
- [9] H. Pérez, y J. J. Gutiérrez, "Modeling the QoS parameters of DDS for event-driven real-time applications" *Journal of Systems and Software*, Volume 104, págs. 126-140, 2015
- [10] H. Pérez, y J. J. Gutiérrez, "Enabling data-centric distribution technology for partitioned embedded systems", *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, Vol. 27(11), págs. 3186-3198, 2016.
- [11] H. Pérez, J. J. Gutiérrez, S. Peiró, y A. Crespo. "Distributed architecture for developing mixed-criticality systems in multi-core platforms". *The Journal of Systems and Software*, Vol. 123, Elsevier, págs. 145-159, 2017.
- [12] H. Pérez, y J. J. Gutiérrez, "Handling heterogeneous partitioned systems through ARINC-653 and DDS". *Computer Standards & Interfaces*, Vol. 50, Elsevier, págs. 258-268, 2017.
- [13] Object Management Group. "A UML Profile for MARTE: Modeling and Analysis of Real-Time Embedded Systems", v1.1. <http://www.omg.org/spec/MARTE/1.1/>. 2011.
- [14] L. Rioux, R. Henia, N. Sordon, M. González Harbour, J.J. Gutiérrez, J.M. Rivas, C. Cuevas, J.M. Drake, y J.L. Medina, "Schedulability analysis and optimization in a model-based integrated tool-chain: Synthetic MARTE models for optimizing real-time design with MAST and TEMPO" *Conf. on Forum on specification & Design Languages, Demo Night Session*, Spain, 2015.
- [15] J. L. Poza, J. L. Posadas, y J.E. Simó. "From the Queue to the Quality of Service Policy: A Middleware Implementation". *Proc. of the Int. Conference on Artificial Neural Networks*, Berlin, 2009.
- [16] Airlines Electronic Engineering Committee, Aeronautical Radio INC. "Aircraft Data Network, Part 7 - Avionics Full Duplex Switched Ethernet (AFDX) Network". ARINC Specification 664-7. September, 2009.
- [17] J.C. Palencia, M. González Harbour, J.J. Gutiérrez, y J.M. Rivas. "Response-Time Analysis in Hierarchically-Scheduled Time-Partitioned Distributed Systems". *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 28(7), págs. 2017-2030, 2017.
- [18] J.J. Gutiérrez, J.C. Palencia, y M. González Harbour. "Holistic schedulability analysis for multipacket messages in AFDX networks". *Journal of Real-Time Systems* 50(2), Springer, págs. 230-269, 2014.
- [19] RTI Connex DDS Micro is available at <http://www.rti.com>. Last access in June, 2017.
- [20] M. Aldea y M. González. "MaRTE OS: An Ada Kernel for Real-Time Embedded Applications". *Proc. of the Int. Conference on Reliable Software Technologies, Ada-Europe*, Leuven, Belgium, LNCS 2043. 2001.
- [21] M. Masmano, I. Ripoll, A. Crespo, y J.J. Metge, "Xtratum a hypervisor for safety critical embedded systems", *Proc. of the 11th Real-Time Linux Workshop*, Germany, 2009.
- [22] IEEE Portable Application Standards Committee (PASC). "Standard for Information Technology-Portable Operating System Interface (POSIX) Realtime and Embedded Application Support", Std. 1003.13. 2003.
- [23] H. Pérez, M. Aldea y D. Medina, "Multiprocessor platform for partitioned real-time systems", *Software: Practice and Experience*, In Press, doi: 10.1002/spe.2404, 2016.

ARQUITECTURA DISTRIBUIDA PARA EL CONTROL AUTÓNOMO DE DRONES EN INTERIOR

Jose-Luis Poza-Lujan

Camino de vera, s/n. 46022 Valencia, jopolu@ai2.upv.es

Juan-Luis Posadas-Yagüe

Camino de vera, s/n. 46022 Valencia, jposadas@ai2.upv.es

Giovanny-Javier Tipantuña-Topanta

Camino de vera, s/n. 46022 Valencia, giotitoa@upvnet.upv.es

Francisco Abad

Camino de vera, s/n. 46022 Valencia, fjabad@ai2.upv.es

Ramón Mollá

Camino de vera, s/n. 46022 Valencia, rmolla@ai2.upv.es

Resumen

Actualmente los drones son uno de los sistemas de control más complejos. Este control va desde el control de la estabilidad del propio dron, hasta el control automático de la navegación de dicho dron en entornos complejos. En el caso de drones que deben navegar en interior los retos tecnológicos son específicos. En el presente artículo se muestra la arquitectura de control inteligente de un dron orientado a la navegación en entornos interiores. La seguridad es el eje principal del diseño del sistema. Esto hace que el principal reto de la arquitectura sea la interconexión segura entre los componentes y la definición de los diferentes métodos de navegación basándose en la seguridad. El dron debe disponer de diversos modos de navegación: manual, reactivo, deliberativo e inteligente. Para la navegación en interior es necesario conocer la posición del dron en todo momento, por ello el sistema debe disponer de un modo de localización similar al GPS, pero que proporcione una precisión mucho mayor. Para los modos deliberativo e inteligente, el sistema debe disponer de un mapa del entorno, así como de un sistema de control que envíe al dron las órdenes de navegación correspondientes. El sistema diseñado se está implementando en el marco del proyecto europeo H2020 AiRT (Arts indoor RPAS Technology transfer). El resultado es una propuesta de arquitectura suficientemente versátil para ser empleadas en sistemas similares y servir como base de diseño para futuras implementaciones.

Palabras Clave: Dron; Navegación en interiores; Sistema distribuido.

1 INTRODUCCION

Los drones son ya una realidad tecnológica que se ha instaurado tanto en la vida cotidiana como en los entornos de trabajo. Los entornos de actuación de los drones pueden ser interiores y exteriores. La mayor parte de los drones tienen un control autónomo para proporcionar la estabilidad y dar soporte a los movimientos del mismo. En el caso de que el dron deba realizar misiones, se precisa de un control autónomo. El control autónomo implica un seguimiento de una ruta, y para dicho seguimiento es necesario disponer de un mapa del entorno, de un mecanismo de posicionamiento dentro de dicho mapa y de un sistema de navegación. Además del modo de pilotaje manual, el sistema de navegación debe disponer, a su vez, de diversas capas. Una capa reactiva que se ocupe de la integridad tanto del dron como del entorno, una capa deliberativa que permita al dron navegar en un entorno conocido, principalmente partiendo del uso del mapa, y una capa inteligente que permita al dron seguir una ruta predefinida. Para poder seguir una ruta en un entorno, el dron necesita de un sistema de localización. En el caso de drones que trabajan en entornos exteriores la localización la proporciona el sistema GPS. Sin embargo, en el caso de los drones que deben navegar en entornos interiores, la localización debe tener mucha más precisión que en entornos exteriores.

Tanto en entornos exteriores como en interiores, la seguridad es el aspecto más importante. En el caso de drones de navegación en entornos exteriores, lo más habitual es que el entorno de trabajo de dichos drones sean entornos poco poblados, dado que su vuelo en núcleos poblacionales está muy limitado.

Sin embargo, los entornos interiores suelen ser entornos donde es habitual encontrar personas, pero también elementos de valor. Por ello, la seguridad que debe proporcionar un dron en interior debe ser mayor. Este aspecto determina, por lo tanto, en gran medida todas las cuestiones relativas al diseño, tanto de la arquitectura de control como del dron.

Para determinar claramente estos aspectos surge el proyecto europeo AiRT (Arts indoor RPAS Technology transfer) en el que se estudia cómo integrar la navegación autónoma en tiempo real de drones en espacios interiores. La finalidad del uso de drones en espacios interiores es emplearlos para la industria creativa. Esta industria precisa del uso de cámaras de muy alta definición y de un soporte o gimbal (cardán) que proporcione a la cámara los suficientes grados de libertad como para realizar las grabaciones necesarias.

Los aspectos previos se presentan en el artículo y se organizan de la siguiente forma: inicialmente se presenta la problemática que trata de resolver el proyecto AiRT. En el siguiente apartado se estudian las necesidades del sistema, especialmente los relativos a la seguridad del entorno y del dron. Seguidamente se presentan los elementos de la arquitectura que dan soporte al sistema para finalizar con la discusión de la experiencia obtenida en los primeros meses de proyecto.

2 EL USO DE DRONES EN ENTORNOS INTERIORES

En el entorno de la industria creativa, para dotar de la mayor cantidad de movimientos posibles a la cámara, es habitual el uso de una gran cantidad de dispositivos como grúas, raíles o armazones portátiles. Estos dispositivos suelen tener muchos inconvenientes: son complejos de montar, manejar y desmontar, aunque la mayor limitación es que tienen un espacio limitado de movimientos. Sin embargo, los vehículos aéreos no tripulados, conocidos como UAVs, RPAs o drones, evitan los inconvenientes anteriormente nombrados. Cuando la grabación se produce en entornos interiores, desde un plató de televisión o cine hasta pabellones deportivos cubiertos, los drones pueden proporcionar tomas desde puntos de vista imposibles con los medios actuales dado que su estabilidad es controlable con una gran precisión [2].

Sin embargo, un dron que realice grabaciones de entornos interiores, requiere de dos características fundamentales: seguridad de todos los elementos (dron y entorno, especialmente si se encuentran personas) y control en tiempo real del dron y de la navegación del mismo. Actualmente la navegación

en interior de drones se realiza mayoritariamente usando drones comerciales, tanto para el control del dron [4] como para el seguimiento de la trayectoria [9]. Siendo éste último aspecto uno de los más interesantes en cuanto a investigación se refiere [6].

Los aspectos de navegación y control en tiempo real del dron son especialmente relevantes para la industria creativa. La posibilidad de disponer de la trayectoria realizada por el dron permite repetir las grabaciones (algo muy habitual en la industria creativa). Por ello, es necesario un sistema de soporte que proporcione las rutas realizadas, o permita diseñar rutas para el dron dentro del entorno. Este sistema, además, implica disponer de un mapa en tres dimensiones del entorno interior, siendo los drones los vehículos más favorables para ser empleados con este fin [3].

3 ARQUITECTURA: SEGURIDAD Y CONTROL

3.1 EL ENTORNO

El entorno de navegación en interior para un dron se caracteriza por tener en cuenta completamente las tres dimensiones. En entornos robóticos, generalmente son dos dimensiones, junto al área de actuación vertical del robot, las que se tienen en cuenta. Sin embargo, los drones tienen una libertad de movimiento similar en todas las dimensiones. Consecuentemente, cada dimensión tiene una serie de limitaciones que se deberán considerar. La figura 1, muestra los límites en el caso menos favorable (el eje vertical).

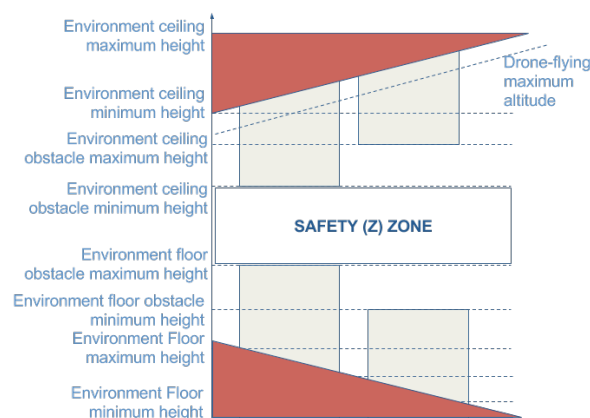


Figura 1: Límites de actuación del dron en el entorno (caso concreto del eje z).

En el centro de la figura 1 se destaca la zona segura en la que sólo se pueden encontrar obstáculos no predecibles, generalmente en movimiento. Los condicionantes del eje vertical son extrapolables al

resto de los ejes. Por ello el mapa del entorno sólo cubre parte de la seguridad, y es el propio dron el que deberá disponer de los mecanismos necesarios para poder detectar aquellos obstáculos no incluidos en el mapa. El hecho de disponer de un mapa, permite determinar las zonas donde, bien por encontrarse obstáculos conocidos o bien por otros motivos, no se desea que el dron vuele.

3.2 NIVELES DE SEGURIDAD

La navegación del dron en un entorno interior con las características descritas en el primer apartado debe tener diversos niveles de seguridad. Dichos niveles de seguridad están relacionados con los niveles de navegación que tiene el dron (figura 2)

	Manual navigation	Reactive navigation	Deliberative navigation	Intelligent navigation
Avoiding obstacles	No	Yes	Yes	Yes
Avoiding forbidden places	No	No	Yes	Yes
Follow the flight path	No	No	No	Yes

Figura 2: Niveles de navegación y características relacionadas.

El principal nivel de seguridad es el que contempla que, incluso, los sensores que proporcionan la detección y evitación de obstáculos al dron pueden fallar, es por ello que el dron debe, siempre, poder ser pilotado de forma manual. El siguiente nivel de seguridad es el nivel reactivo, donde los sensores incorporados al dron deben detectar los obstáculos y el sistema reactivo evitarlo. El nivel deliberativo es el que permite al dron volar en los espacios que, en el mapa, están autorizados, comprobar si se sigue una ruta o, incluso, generar rutas. Esto se debe a que la navegación deliberativa implica el uso del mapa para aquellos aspectos en que pueda ser de utilidad. Finalmente, el nivel inteligente es aquel en el que la navegación no es pilotada por personas, sino que el sistema es el que guía al dron. Para este guiado, además de disponer de un mapa, se debe disponer de una ruta ya establecida que el dron deberá seguir. Los niveles de seguridad son prioritarios. La navegación manual tiene prioridad sobre todos los modos. La reactiva, es prioritaria sobre la deliberativa y la inteligente, siendo esta última la de menor prioridad.

4 ARQUITECTURA PROPUESTA

A partir de las características anteriores, se diseñan los componentes de la arquitectura del sistema. Dado que debe haber una navegación deliberativa e inteligente, el sistema debe disponer de un mapa y de un método de posicionar al dron dentro de dicho

mapa. Además, la navegación inteligente precisa de un método de especificación de rutas a seguir y de acciones a tomar durante la navegación en dicha ruta. Las acciones son las propias de la misión del dron, en concreto son acciones de navegación (movimiento entre puntos, instante temporal y velocidad a la que debe moverse) y acciones de grabación (parámetros de la cámara de grabación, orientación de cámara, instantes en que debe empezarse y debe finalizar la grabación, etc. En la figura 3, se muestran los principales bloques del sistema.

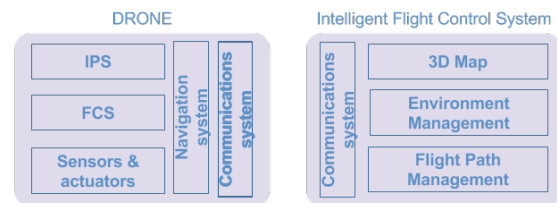


Figura 3: Bloques de la arquitectura propuesta.

4.1 DRON

El dron empleado es un diseño de la empresa Aerotools UAV [1]. El dron dispone de una serie de sensores y actuadores propios de este tipo de vehículos, tales como el Global Positioning System (GPS) o el Inertial Measurement Unit (IMU). Sin embargo, para la navegación reactiva, son necesarios más sensores, en concreto un sistema de sensores de rango, que permiten detectar y evitar obstáculos, y un Indoor Positioning System (IPS) que suple al GPS en entornos interiores. En el caso de los actuadores, se dispone de los actuadores propios de un dron (motores y balizas), pero incrementados con zumbadores que permitan avisar acústicamente en el caso de situaciones de emergencia. La lectura de los sensores, y actuación correspondiente, es realizada por el Flight Control System (FCS).

Para la creación del mapa, el dron va equipado con una cámara RGBD ampliamente usada para tareas similares de reconstrucción 3D [7]. Para la grabación, el dron dispone de un cardán que debe ser controlable y una cámara de grabación 4K. Las cámaras para el mapa y para la grabación son gestionadas por el sistema de navegación.

4.2 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO INTELIGENTE (IPS)

El sistema de posicionamiento inteligente se basa en tecnología Ultra Wide Band (UWB) [5]. Este sistema consiste en una serie de antenas situadas en el entorno y un receptor situado en el dron. El sistema está desarrollado por la empresa Pozyx [8].

4.3 SISTEMA INTELIGENTE DE NAVEGACION AUTÓNOMA

Las tareas principales de este módulo son la creación del mapa, la asistencia al usuario para la creación del plan de vuelo y la monitorización de los vuelos. Para la creación del mapa 3D del espacio donde se moverá el dron se utilizará una cámara de profundidad a bordo. Dicha cámara es capaz de capturar tanto la geometría de la escena como su textura. El resultado de una captura de dicha cámara es una nube de puntos (figura 4), donde cada punto está definido por sus 3 coordenadas (X, Y, Z) con respecto a la cámara, y su color. Para construir un mapa global de la escena, es necesario transformar cada una de las nubes de puntos capturadas a un sistema de coordenadas común. El sistema de posicionamiento proporciona en cada momento la posición y orientación del dron (y, por lo tanto, de la cámara), lo que permite llevar cada punto del sistema de la cámara al sistema de coordenadas común. De esta forma el alineamiento de varias nubes de puntos resultará en un modelo 3D consistente con mínimas distorsiones (las debidas a la precisión de los sensores empleados). Para optimizar este proceso es necesario eliminar aquellos puntos que se corresponden con el ruido inherente del sensor de profundidad y las condiciones de iluminación. Así mismo, durante el alineamiento de las nubes de puntos, se deben descartar aquellos puntos que se encuentran en una zona que ya ha sido registrada en el modelo 3D global y añadir únicamente aquellos que se encuentran en zonas no registradas.

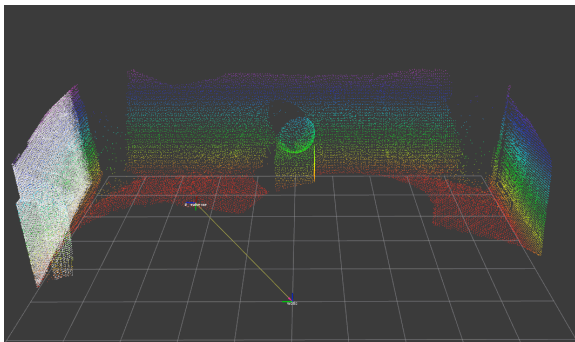


Figura 4: Simulación del alineamiento de nubes de puntos.

Una vez que se ha capturado el mapa del entorno, el sistema permitirá al usuario definir el plan de vuelo. El plan de vuelo consiste, como se ha explicado antes, en una secuencia de puntos de paso (*waypoints*) por los que tiene que pasar el dron, y la configuración del gimbal y la cámara. Para realizar dicho plan de vuelo, el sistema mostrará al usuario una interfaz de usuario con varias vistas del mapa capturado en el paso anterior. El usuario podrá definir el camino que debe seguir el dron, y la posición y orientación de la cámara en cada punto del

camino. Para ello tan sólo deberá manejar una cámara virtual, que le mostrará una aproximación de lo que verá la cámara real, una vez que el dron ejecute el plan de vuelo, y se encuentre en dicho punto. Definir el plan de vuelo off-line permite no depender de la duración de las baterías del dron y poder trabajar en cualquier momento y lugar, incluso sin acceso al dron. Por último, la interfaz de usuario proporcionará herramientas para ajustar el plan de vuelo durante la realización del vuelo. El usuario tendrá varias opciones para controlar el plan de vuelo. Por ejemplo, el dron puede actuar como una *cable cam*. Este dispositivo consiste en un cable instalado en la zona de grabación, del que cuelga la cámara. La cámara está instalada sobre una plataforma motorizada, que permite avanzar o retroceder sobre el cable. Siguiendo esta metáfora, se podría considerar que el plan de vuelo es el cable (es mucho más flexible, puesto que puede seguir formas más complejas que un cable real), y entonces el operador podría, durante la grabación, tener herramientas para avanzar, retroceder, parar, acelerar o decelerar a lo largo de ese cable virtual. Esta interfaz permite a un usuario poco experimentando en el vuelo de drones realizar vuelos complejos fácilmente.

4.4 COMUNICACIONES

El sistema de comunicaciones es el responsable de gestionar la conexión entre todos los elementos. Esta conexión se da entre los propios elementos del dron y entre el dron y el sistema de navegación inteligente.

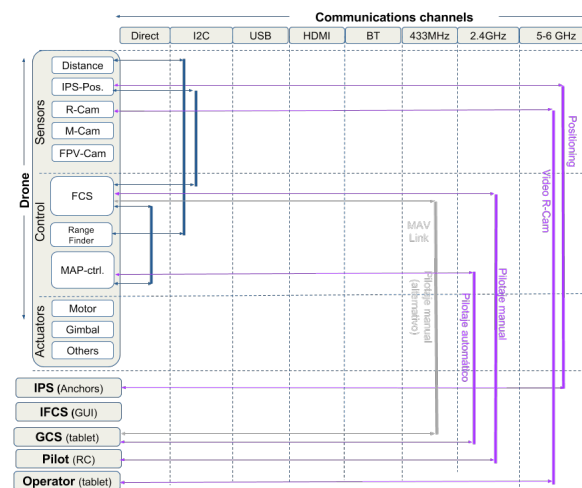


Figura 5: Interconexión de los componentes del sistema.

El principal reto de las comunicaciones está en la heterogeneidad de los componentes y en los requisitos que los diferentes modos de navegación imponen. En la figura 5 se muestran los componentes y las conexiones entre ellos.

Internamente el dron se conecta por medio de enlaces directos y el bus I2C. Dejando la conexión USB y HDMI como medios auxiliares de soporte en caso de necesitarse una vía alternativa. La conexión entre el dron y el sistema de control (tanto el piloto como el sistema automático inteligente) se realiza por medio de diferentes canales. El modo de navegación manual emplea la frecuencia de 2.4GHz, dado que esta frecuencia también la emplea el control automático, simplificándose de esta forma el acceso a las órdenes por parte del dron. Sin embargo, el modo de navegación manual también puede emplear la frecuencia de 433 MHz como modo de emergencia. Ya que la navegación manual es la considerada de emergencia debe poder facilitarse dos canales para dar soporte al fallo de uno de ellos.

El sistema de posicionamiento emplea la frecuencia de 5GHz. Esta frecuencia es compartida, por medio de bandas, con la emisión de la cámara de grabación. Esto se debe a que la cámara de muy alta definición precisa de un considerable ancho de banda para poder enviar las imágenes de vídeo correspondientes.

5 FUNCIONAMIENTO

Los componentes presentados anteriormente se ponen en marcha en diferentes fases, numeradas en función del vuelo del dron que se responsabiliza de la misma. Las fases se muestran en la figura 6.

	Flight 0	Flight 1	Flight 2	...	Flight i
Position (IPS)	Calibrating	Available	Available	○○○	Available
3D Map	Not available	Being generated	Available	○○○	Available
Flight plan	Not available	Not available	Testing	○○○	Available
Pilot	Necessary	Necessary	Recommended	○○○	Not Necessary
Operator	Not necessary	Not necessary	Necessary	○○○	Necessary

Figura 6: Funcionamiento del sistema propuesto.

La fase inicial (vuelo 0) es la que se emplea para calibrar el sistema de posicionamiento, dado que la posición del dron es fundamental para la creación del mapa. Una vez se ha calibrado el sistema de posicionamiento, se pasad al vuelo 1, donde debe construirse el mapa usando la cámara RGBD. Dado que en estas dos etapas no se dispone de mapa, el dron debe ser pilotado por personal experto. El vuelo 2, es el primero en el que se dispone de la posición del dron y del mapa del entorno. En este vuelo no es imprescindible contar con un piloto, dado que el

objetivo principal del mismo es determinar el plan de vuelo (incluyendo las acciones que debe realizar la cámara de grabación).

Cada uno de los diferentes vuelos de la puesta en funcionamiento se asocian con modos de navegación. El vuelo 0 y el vuelo 1 se asocian al modo de navegación reactivo. Una vez creado el mapa se puede realizar el vuelo 2, asociado al modo de navegación deliberativo. De esta forma, conociendo el entorno y las zonas de vuelo permitidas, el operador ya puede decidir qué tomas desea realizar. El vuelo 2 puede repetirse las veces que sea necesario para así dejar el plan de vuelo listo para los posteriores vuelos, que ya pueden realizarse en modo de navegación inteligente.

6 CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha mostrado la arquitectura inicial del proyecto AiRT. Esta arquitectura está orientada a lograr la navegación autónoma de un dron en entornos interiores. La misión del dron es la grabación de vídeos y fotografías con cámaras de muy alta definición. En el artículo se ha mostrado las dificultades que este tipo de misión implican. Para lograr realizar este tipo de misiones, el sistema precisa de diferentes modos de navegación. Lo cual determina proporcionar al dron de una cantidad de sensores no habitual y de un sistema de posicionamiento en interiores.

Actualmente se tienen dos retos concretos para alcanzar como metas del proyecto. El primero de ellos consiste en lograr parametrizar correctamente la medición de la navegación del dron, ya que no sólo deben tenerse en cuenta los parámetros clásicos de la navegación de robots en entornos interiores, sino también los cambios entre modos de navegación. El hecho de que los entornos interiores se compongan de volúmenes, por lo general, más pequeños que los entornos exteriores hace que los cambios entre modos deban realizarse en tiempo real estricto. El siguiente de los retos consiste en lograr una navegación autónoma completa. Esto implica que el dron no deba depender en ningún momento de pilotaje experto. Este aspecto implica que los vuelos de calibración y aprendizaje del entorno deban realizarse de forma autónoma sin un mapa y sin un sistema de posicionamiento calibrado. Este reto incluye el uso de técnicas de SLAM y de aprendizaje automático.

Finalmente, el proyecto tiene dos posibles ramas para continuar desarrollándose: la navegación híbrida entre entornos interiores y exteriores, y la navegación simultánea de varios drones compartiendo mapa y sistema de posicionamiento.

Agradecimientos

Este proyecto está financiado por el programa de la Unión Europea Horizonte 2020 de código No 732433 – AiRT.

Referencias

- [1] AeroTools-UAV. [Online: julio 2017]. Available: www.aerotools-school.es
- [2] Castillo, P., García, P., Lozano, R., & Albertos, P. (2007). Modelado y estabilización de un helicóptero con cuatro rotores. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 4(1), 41-57.
- [3] Heng, L., Honegger, D., Lee, G. H., Meier, L., Tanskanen, P., Fraundorfer, F., & Pollefeys, M. (2014). Autonomous visual mapping and exploration with a micro aerial vehicle. *Journal of Field Robotics*, 31(4), 654-675.
- [4] Hussein, A., Al-Kaff, A., de la Escalera, A., & Armingol, J. M. (2015, November). Autonomous indoor navigation of low-cost quadcopters. In *Service Operations And Logistics, And Informatics (SOLI), 2015 IEEE International Conference on* (pp. 133-138). IEEE.
- [5] Lee, J. S., Su, Y. W., & Shen, C. C. (2007, November). A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi. In *Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE* (pp. 46-51). IEEE.
- [6] Martinez, S. E., & Tomas-Rodriguez, M. (2014). Three-dimensional trajectory tracking of a quadrotor through PVA control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 11(1), 54-67.
- [7] Munera, E., Poza-Lujan, J. L., Posadas-Yagüe, J. L., Simó-Ten, J. E., & Noguera, J. F. B. (2015). Dynamic reconfiguration of a RGBD sensor based on QoS and QoC requirements in distributed systems. *Sensors*, 15(8), 18080-18101.
- [8] Pozyx - Accurate Positioning. [Online: julio 2017]. Available: <http://www.pozyx.io>
- [9] Santana, L. V., Brandao, A. S., Sarcinelli-Filho, M., & Carelli, R. (2014, May). A trajectory tracking and 3d positioning controller for the ar. drone quadrotor. In *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2014 International Conference on* (pp. 756-767). IEEE.

Ingeniería Conducida por Modelos en Sistemas de Automatización Flexibles

R. Priego*, E. Estévez**, D. Orive*, I. Sarachaga*, M. Marcos*

*Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, UPV/EHU, España

email: {rafael.priego, dario.orive, sabel.sarachaga, marga.marcos}@ehu.eus

**Dpto. Ingeniería Electrónica y Automática, EPS de Jaén, España

email: eestevez@ujaen.es

Resumen

Los sistemas de automatización industrial actuales tienen que hacer frente a los desafíos que surgen al tratar de solventar las necesidades generadas por un mercado altamente competitivo. Por ello, los sistemas de automatización modernos tratan de ofrecer soluciones más flexibles y eficientes con objeto de satisfacer requisitos como: eficiencia energética, optimización de rendimiento y/o tolerancia a fallos en el proceso o controlador. El hecho de añadir mecanismos de reconfiguración en este tipo de sistemas permite alcanzar muchos de estos requisitos pero a cambio de incrementar la complejidad en diseño e implementación. Este trabajo explora las ventajas de la Ingeniería Conducida por Modelos para manejar dicha complejidad. En concreto, se presenta una plataforma basada en modelos que ayuda y guía en el diseño y desarrollo de sistemas de automatización flexibles. La aproximación propuesta está fundamentada en dos estándares muy aceptados en el sector de la automatización: AutomationML e IEC 61131-3.

Palabras Clave: Sistemas de Automatización Flexibles, Ingeniería Conducida por Modelos, AutomationML, IEC 61131-3, PLCopen.

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, instituciones públicas de países como Alemania [4], Estados Unidos [7] e incluso a nivel de Europa [16] están haciendo una apuesta en la automatización industrial con objeto de fomentar la innovación, empleo y crecimiento económico. Estas iniciativas persiguen la satisfacción de requisitos de integración, reutilización, flexibilidad así como la optimización del proceso de fabricación mediante soluciones de alta tecnología fundamentadas en equipos y sistemas adaptables e inteligentes [2].

En este contexto, los sistemas de automatización han comenzado a soportar mecanismos de reconfiguración dinámica con objeto de garantizar

requisitos no funcionales entre los que se encuentran aquellas propiedades que hacen que los productos sean más atractivos, utilizables, fiables o seguros sin modificar la funcionalidad del producto.

El término de reconfiguración se puede utilizar para referirse o representar diferentes situaciones [18], [12], [24]. Este trabajo usa dicho término como la capacidad de reubicar las diferentes funcionalidades sobre el sistema de control distribuido con objeto de optimizar algún tipo de calidad de servicio. Por ejemplo: rendimiento del controlador [6], consumo de la batería [8] o la continuidad del servicio a pesar de fallo en el controlador o en la red [14], [19].

Sin embargo, la integración de los mecanismos de reconfiguración dentro de los sistemas de producción de automatización implica un aumento de su complejidad en términos de tamaño, funcionalidad y distribución, lo que hace que su diseño y desarrollo sean más complejos. En este contexto, se ha demostrado que el uso de la Ingeniería Conducida por Modelos (MDE- Model Driven Engineering) es adecuado para guiar y ayudar en las fases de diseño, desarrollo e implementación de sistemas complejos [17].

El uso de MDE en la automatización industrial no es nuevo [5], [9], [11], [20], [21], [23]. En los últimos años, se han publicado trabajos que hacen uso de estas técnicas para extender la caracterización de los sistemas (e.g. controladores, máquina, Unidades de programación POU-Program Organization Units- ...) para poder soportar el concepto de reconfiguración. [10] caracteriza la vista del software con información relacionada a las demandas de recursos (cantidad de memoria y número de bytes intercambiados con otros bloques de función FB) y esta información se utiliza para decidir los nodos del sistema en los que se desplieguen los FB. [22] introduce requisitos funcionales y no funcionales como restricción en las diferentes vistas de producción del sistema de automatización, comenzando por los sensores y actuadores hasta la planta completa. [3] presenta una caracterización de requisitos no funcionales basada en aspectos para sistemas de control embebidos.

El objetivo de este trabajo va un paso más allá de los trabajos comentados anteriormente. Se presenta una plataforma basada en modelos que permite generar

los mecanismos necesarios para asegurar una determinada calidad de servicio a los sistemas de automatización. Se trata de una plataforma construida a partir de dos estándares bien aceptados en el sector que además tienen notación de Lenguaje de Marcado (ML-Markup Language), como son: AutomationML [1] y PLCOpenXML [13]. Por lo tanto, las contribuciones de dicho trabajo son: (1) una aproximación de modelado que captura la información relevante del proceso de producción y el sistema distribuido de automatización, así como, cómo pasarlo a información valiosa para la plataforma de gestión en tiempo de ejecución; (2) un conjunto de herramientas que implementa la aproximación añadiendo flexibilidad a los sistemas de automatización originales, soportando una reconfiguración dinámica del sistema de control.

La estructura del trabajo es la siguiente: la sección 2 presenta una aproximación basada en AutomationML para modelar sistemas de automatización flexibles. Las secciones 3 y 4 se centran en la generación automática de código. Concretamente, la sección 3 detalla la generación de proyectos de automatización flexibles, mientras que la sección 4 detalla el procedimiento a seguir para la generación de código dependiente de la aplicación. La sección 5 presenta un caso de estudio y finalmente las conclusiones más relevantes se detallan en la sección 6.

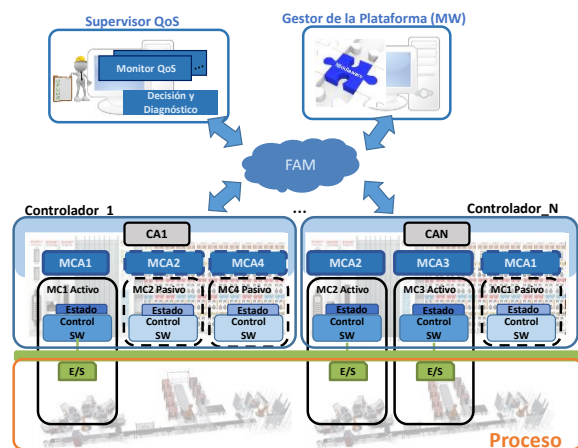
2 DISEÑO DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN RECONFIGURABLE

Esta sección en primer lugar define lo que se entiende por un sistema de automatización reconfigurable y posteriormente propone las pautas de su diseño haciendo uso de MDE y del estándar AutomationML.

2.1 SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN RECONFIGURABLE

Los módulos que forman un sistema de automatización reconfigurable son los siguientes:

- Controladores autómatas programables (PLC-Programmable Logic Controller) distribuidos.
- Componentes Mecatrónicos (MC- Mechatronic Components). Cada MC gestiona una parte del proceso (mecánica, eléctrica y electrónica) a través de instrumentación y hardware de control y una pieza de software que puede ejecutarse en diferentes PLCs.
- Plataforma de ejecución, responsable de garantizar el cumplimiento total de la calidad de servicio del sistema en tiempo de ejecución.



Agentes Dependientes de la aplicación: un CA por cada controlador (CA1..N) y un MCA por cada MC en el controlador

Fig. 1: Escenario general de un sistema de automatización reconfigurable

La Fig. 1 presenta el escenario general para los sistemas de automatización reconfigurables. Este trabajo adopta como plataforma de gestión FAM (Flexible Automation Middleware) que personaliza un MAS (Multi Agent System) genérico para monitorizar una determinada calidad de servicio (fallo de controlador, balance de carga...) lanzando una reconfiguración del sistema en caso de no estar cumpliéndose [15].

La reconfiguración implica desactivar componentes mecatrónicos en algunos controladores y activarlos en otros sin alterar la funcionalidad de la aplicación. Para poder activar y desactivar MCs, también se han de caracterizar por sus posibles modos de operación:

- **Estado no crítico:** aquellos estados donde el sistema de automatización sabe el estado actual del proceso, por lo que los MCs pueden ser activados en otro controlador con el estado inicial que sea el último estado conocido del MC desactivado.
- **Estado crítico:** aquellos estados donde el sistema de automatización no conoce exactamente el estado actual del MC. Los estados críticos inhiben la activación / desactivación de MCs para evitar comportamientos impredecibles del proceso. Por ejemplo después de fallo de controlador es necesario analizar si todos los MCs que se estaban ejecutando en él pueden ser recuperados en un estado previo conocido (*checkpoint*) o por el contrario no es posible y por lo tanto hay que parar al MC de forma segura y avisar al operario (*non-recovery*).

Finalmente es importante destacar que FAM también es responsable de asegurar que en ejecución todos los MCs de la aplicación estarán activos en un solo controlador. Para ello, incluye cuatro tipos de

agentes. Dos de ellos forman parte de la arquitectura básica para el manejo de calidad de servicio: (1) Gestor de la plataforma (MW) y (2) Supervisor que a su vez está formado por un agente de monitorización y un agente Decisión y Diagnóstico. Otros dos dependen de la aplicación de automatización: (3) Agente de Controlador (CA-Controller Agent) para registrar el controlador y sus recursos y (4) Agente de MC (MCA-Mechatronic Component Agent) para manejar la ejecución del MC. Tal y como se resalta en Fig. 1 habrá un CA por controlador y tantos MCAs como MCs tenga vinculados dicho controlador.

2.2 AML Y DISEÑO DEL SISTEMA

Los desarrolladores diseñan e implementan los sistemas de automatización como un conjunto de MCs que utilizan un conjunto de E/S, POU y variables. Además, cada MC se caracteriza por un conjunto de intervalos críticos definidos por una condición. Dichos MCs se replican en los diferentes controladores del sistema.

Para facilitar el diseño de este tipo de sistemas, este trabajo ha hecho uso de AutomationML (AML) al que le ha añadido los mecanimos necesarios para que los desarrolladores puedan especificar las características de los MCs. De hecho, se ha definido una librería CAEX teniendo en cuenta los conceptos que aparecen en los sistemas de automatización flexibles. La Fig. 2 detalla la librería CAEX definida. La Fig. 3 presenta un ejemplo de diseño de un sistema de automatización flexible.

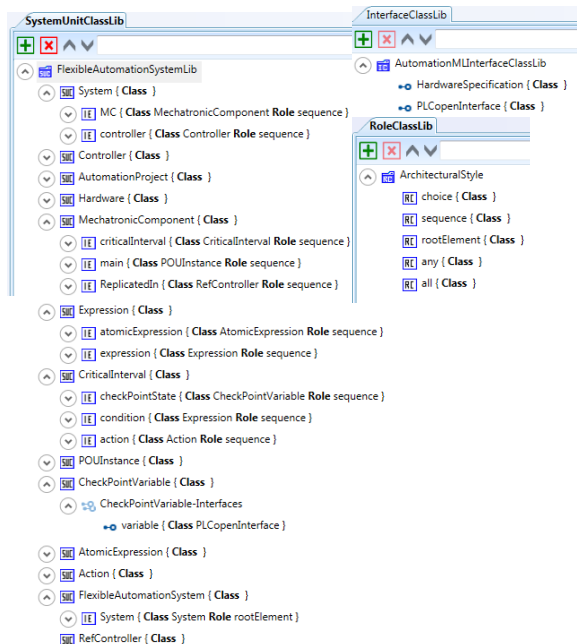


Fig. 2: Librería CAE para Sistemas de Automatización Flexibles

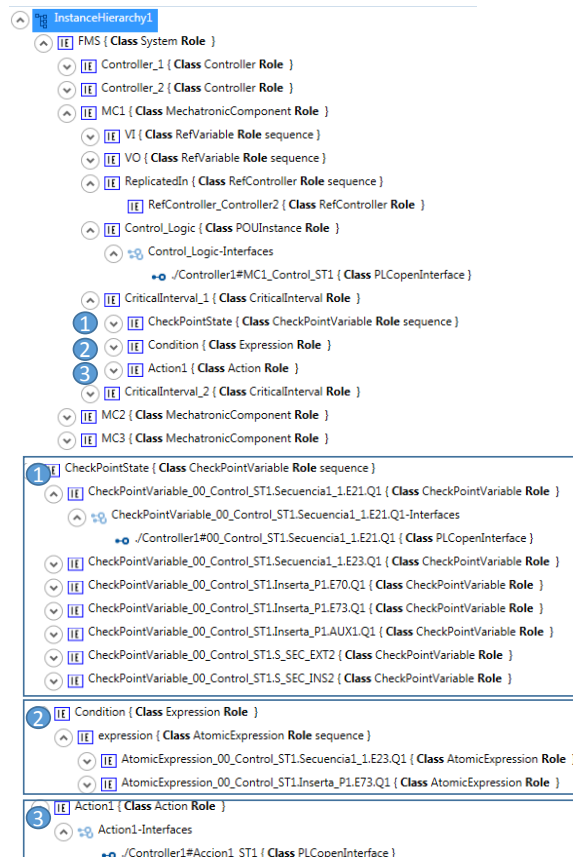


Fig. 3: Ejemplo de Diseño de un Sistema de Automatización Flexible

3 GENERACIÓN AUTOMÁTICA DE UN PROYECTO DE AUTOMATIZACIÓN FLEXIBLE

Actualmente los entornos de ejecución estándar IEC 61131-3 no soportan despliegue dinámico de código en tiempo de ejecución por lo que impiden una reconfiguración de la aplicación. Para solventar esta limitación, los proyectos de automatización flexibles (generados automáticamente) contendrán la lógica de control de todos los MCs que se puedan ejecutar en el controlador. Por eso, este trabajo cuando se hace referencia a reconfiguración implica la desactivación de un MC en un controlador y la activación en otro. Otro aspecto a tener en cuenta es la gestión de ejecución de los MCs. Dicha gestión la realiza su correspondiente MCA para lo cual necesita consultar y actualizar el estado del MC. Por tanto, un proyecto de automatización flexible contiene no solo la funcionalidad de los MCs sino todo el código que les proporciona la flexibilidad. Dicha flexibilidad implica la generación automática de tres POU's:

- MCid_Control: programa de control que maneja la ejecución de la lógica del MC.
- MCid_Serialize: programa que recoge y serializa el valor de las variables que forman el estado del MC.

- **MCid_Derialize:** programa que de-serializa y fija los valores de las variables que forman el estado del MC.

El Generador automático de los Proyectos de Automatización Flexibles recoge información del modelo AML y haciendo uso de técnicas M2M genera el proyecto final en formato PLCopenXML.

Los siguientes sub-apartados detallan el procedimiento seguido.

3.1 PROGRAMA QUE GESTIONA LA EJECUCIÓN DEL MC (*MCid_Control*)

Este programa, que se generará de forma automática, permitirá al MCA correspondiente activar/desactivar la ejecución de la lógica así como lanzar las acciones de recuperación/parada del MC que gobierne. Como cualquier POU tiene dos partes bien diferenciadas: interfaz y cuerpo

La interfaz está compuesta por un conjunto de variables dependientes de la aplicación y tras locales estáticas que permiten al MCA gestionar la lógica de control de su MC. En concreto *isActive* y *wasActive* para gestionar la activación y desactivación del MC. Para dar soporte a la QoS de disponibilidad de controlador, hacen falta además *recoveryAction* y *Action_CriticalIntervalID* que permiten lanzar las acciones de recuperación cuando sea necesario antes de activar el MC.

Por otro lado la estructura del código es la siguiente:

```
IF isActive=TRUE and wasActive=TRUE THEN
  MCid(); /* MC enriquecido */
  MCid_Serialize();
ELSE IF isActive=TRUE and wasActive=FALSE THEN
  CASE recoveryAction OF
    /* lista de valores en función del MC
       depende de los intervalos críticos del MC */
  END_CASE
ELSE IF isActive=FALSE and wasActive=TRUE THEN
  wasActive=FALSE;
END_IF
```

Finalmente, a través de una nueva regla de transformación se completa la lista de los posibles casos de activación del MC (*isActive=TRUE and wasActive=FALSE*). La siguiente tabla detalla las plantillas de código en ST (Structured Text) a añadir en cada caso.

Tabla 1: Plantillas de código para estados no críticos y críticos

Direct recovery	Check Point Recovery	Safe Stop
MCid_Deserialize(); MCid (); MCid_Serialize(); wasActive=TRUE;	MCid_Action_id(); IF(MCid_Action_id.end) THEN MCid_Deserialize(); MCid (); MCid_Serialize(); wasActive=TRUE; recoveryAction=0; END_IF	MCid_Action_id(); IF(MCid_Action_id.end) THEN recoveryAction=0; isActive=FALSE; END_IF

3.2 SERIALIZAR Y DE-SERIALIZAR EL ESTADO DEL MC

El programa serializar es capaz de reunir los estados de ejecución en una matriz de bytes, para que sea accesible por el MCA. Así mismo, el programa de-serializar sigue la misma estructura pero en lugar de recoger la información en un array, la extrae y re-escribe el valor de las variables de estado.

Por ello, la interfaz de estos POU's será una variable local llamado *state* que será un array de bytes.

La funcionalidad ST del POU serializar es:

```
state[0]:=TypeOfGlobalVariable_TO_BYTE(GlobalVariable);
...
state[NumberOfBytes]:=TypeOfGlobalVariable_TO_BYTE(GlobalVariable);
```

Por otro lado la funcionalidad en ST del POU de-serializar:

```
GlobalVariableName:=BYTE_TO_TypeOfGlobalVariable
(state[0]);
...
GlobalVariableName = BYTE_TO_TypeOfGlobalVariable
(state[NumberOfBytes]);
```

4 GENERACIÓN AUTOMÁTICA DE AGENTES DE APLICACIÓN

Para la generación de los agentes dependientes de aplicación se ha definido una plantilla (en Java) para los MCAs y otra para los CAs. Dichas plantillas tienen una serie de propiedades dependientes de la aplicación que se rellenan automáticamente por el generador de código que extrae información pertinente del fichero AML.

Los siguientes sub-apartados detallan la generación de MCAs y CAs respectivamente.

4.1 AGENTES DE LOS COMPONENTES MECATRÓNICOS (MCA)

Como se detalla en [15], los MCAs implementan una máquina de estados finitos (FMS), concretamente con los estados: Boot, Active, Tracking, Wait Decision y End. La Fig. 4 ilustra a través de un diagrama de clases UML la estructura general de la plantilla que ha sido implementada como una FSM de JADE.

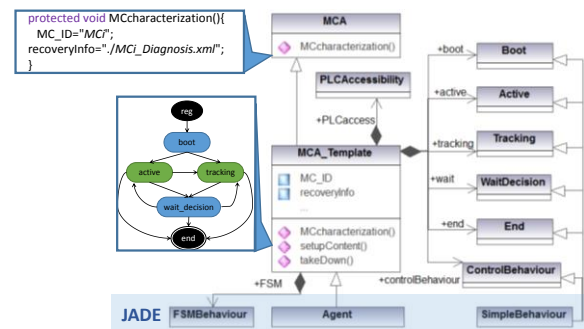


Fig. 4: Estructura general de MCA

Cada estado tiene asociada una funcionalidad implementada como dos Behaviors de JADE (SimpleBehavior). Por otro lado, PLCAccessibility proporciona acceso al código de MC en el PLC.

Tiene dos propiedades parametrizables: *MC_ID* que es el ID del MC y *recoveryInfo* que direcciona al conjunto de máscaras que definen los intervalos críticos del MC. La siguiente figura presentan la estructura de dicho fichero a través de un XML Schema.

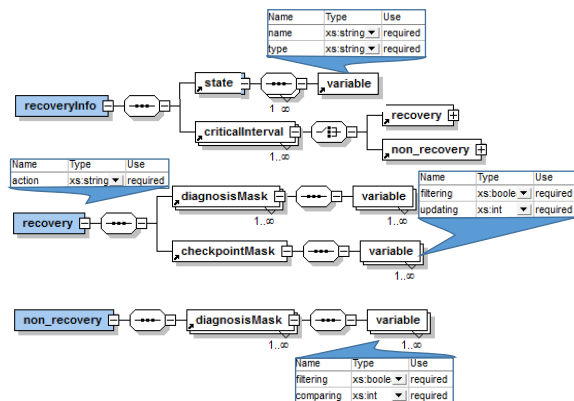


Fig. 5: Estructura general del fichero `recovery.xml`

Este fichero contiene información sobre las variables que forman el estado del MC, las máscaras para realizar el diagnóstico así como los checkpoint. Las máscaras de diagnóstico filtran las variables de estado relacionadas a la condición permitiendo así determinar el tipo de estado crítico (a checkpoint o irre recuperable).

4.2 AGENTES DE CONTROLADOR (CA)

Los CAs proporcionan información actualizada del estado de los recursos del controlador. Estos agentes también participan en el proceso de negociación cuando sea necesario. El criterio de negociación depende de la calidad de servicio que tenga asociada.

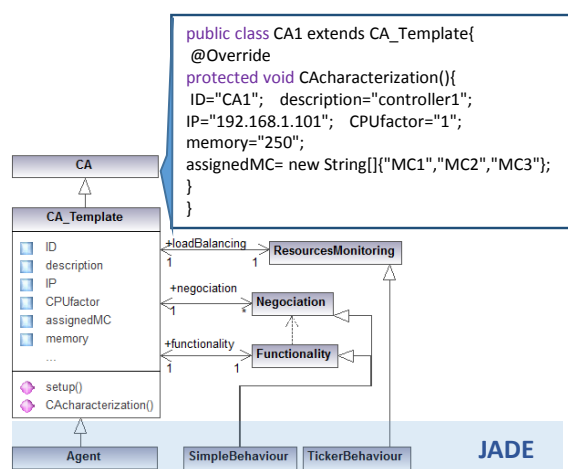


Fig. 6: Estructura general de la plantilla CA

La Fig. 6 detalla a través de un diagrama de clases UML la estructura general de la plantilla CA. La funcionalidad básica de CA se implemente en un “Behavior” cíclico que se gestiona los mensajes de los agentes de la plataforma. Por otro lado, el CA también implementa una monitorización de recursos del controlador. La plantilla definida tiene una serie de parámetros dependientes de la aplicación: ID, una descripción y un factor de CPU para tomar como referencia, recursos de memoria y la lista de MCs cuya lógica de control está vinculada al controlador (*AssignedMC*).

5 CASO DE ESTUDIO

La aproximación para el modelado y generación automática de proyectos de automatización flexibles propuesta en el presente trabajo ha sido aplicada con objeto de asegurar un balance de carga entre los controladores en un sistema de automatización como es la célula de fabricación flexible FMS-200. Esta célula consta de cuatro estaciones y un sistema de transporte que se encarga del ensamblado de 4 piezas (base, rodamiento, eje y tapa).

La primera estación se comprueba si la base está en la orientación correcta y si es así se coloca en el pallet situado en el sistema de transporte. En la segunda, se coloca el rodamiento y eje, mientras que la tapa se coloca en la tercera estación. Finalmente, la pieza montada se almacena en un almacén.

La célula está formada por 5 componentes mecatrónicos, uno por cada estación y otro para el sistema de transporte. Sin embargo, con objeto de simplificar la problemática únicamente se considerarán los MCs correspondientes a las tres primeras estaciones.

En lo referente al demostrador, éste está formado por dos controladores Beckhoff CX1020 donde se ejecutará la lógica de los MCs. Además estará dotado de un PC supervisor donde se ejecutarán el MW y el supervisor. La estación 1 tiene cinco intervalos críticos con sus correspondientes acciones que permiten que la estación continúe extrayendo las bases del almacén.

La Fig. 3 presenta parte de la especificación de los MCs indicados en el modelo AML, concretamente se resalta la caracterización del MC1.

Una vez aplicada las transformaciones indicadas en el trabajo se genera el proyecto de automatización flexible, los CAs y los MCAs junto con los ficheros de diagnóstico y se despliegan en los correspondientes controladores.

Por ejemplo, la siguiente figura ilustra parte del proyecto de automatización flexible generado para el controlador 1 en formato PLCopen XML. En rosa aparece remarcado los POU's procedentes de proyecto de automatización modular y en verde los POU's generados automáticamente.

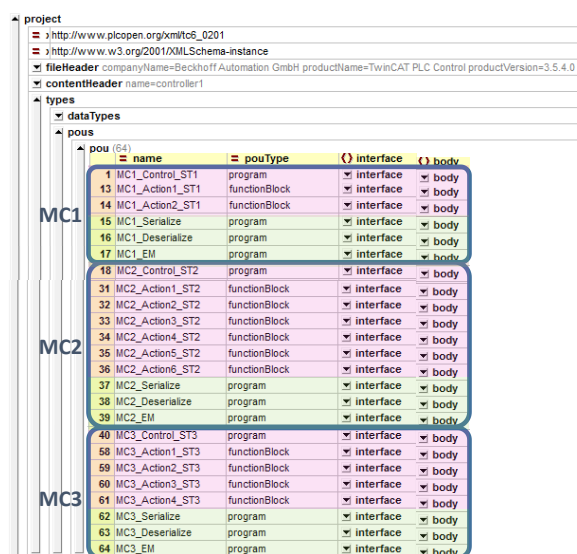


Fig. 7: Proyecto de Automatización Flexible para el controlador 1

Se han realizado una serie de pruebas de reconfiguración en tiempo de ejecución. En concreto, se ha comenzado teniendo arrancado únicamente el controlador 1 como si se tratase de una aplicación centralizada. Posteriormente se ha arrancado el controlador 2. Después de registrarse, la monitorización de la carga detecta que dicho controlador está muy por debajo de la carga especificada. Así el CA2 envía un evento de balance de carga a FAM quien decide una nueva distribución basándose en los factores de CPU de los CAs, distribución actual de los MCs, así como la máxima carga de CPU que introducen los MCs. Una vez obtenida la nueva distribución empieza el proceso de recolocación. Durante este proceso, el MCA activo para la ejecución del código de control en un estado no crítico. Después del proceso de reconfiguración, MC1 y MC2 se ejecutan en el controlador 1 y MC3 en el controlador 2. La Fig.8 presenta a modo de gráfica la carga de CPU de los controladores antes y después de la reconfiguración.

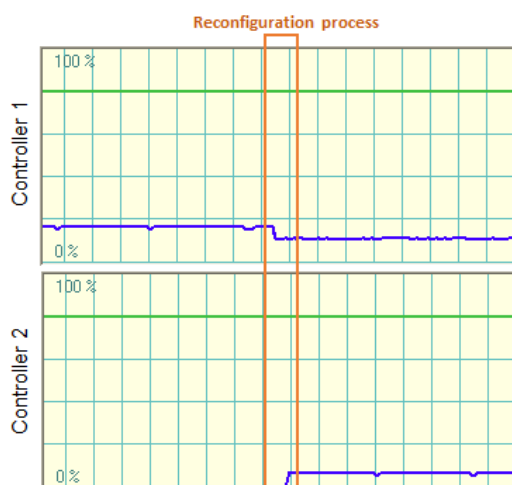


Fig. 8: carga de controlador 1 y 2 antes y después de la reconfiguración

6 CONCLUSIONES

Este trabajo ha presentado una aproximación centrada en añadir flexibilidad a los sistemas de automatización, permitiendo así soportar reconfiguración de los sistemas de control.

Se ha hecho uso de una plataforma de gestión basada en MAS que proporciona gestión de QoS en tiempo de ejecución. Los autores, proponen un diseño basado en modelos que permite capturar la información relevante sobre los procesos de producción, sistemas de automatización distribuidos, así como, cómo hacer uso de dicha información para gestionar la plataforma. Así la solución propuesta proporciona soporte al ciclo desarrollo donde el código resultante es: un proyecto de automatización flexible por cada controlador, tantos CAs como controladores hayan en el sistema y por cada controlador tantos MCAs y MCs como él maneje.

Por lo tanto, la solución propuesta permite añadir flexibilidad a los proyectos de automatización modulares originales, soportando reconfiguración dinámica del sistema de control.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto DPI2015-68602-R (MINECO/FEDER, UE), por la UPV/EHU en el marco del proyecto PPG17/56 y GV/EJ en el marco de grupos de investigación reconocidos IT914-16.

Referencias (10 ptos, negrita)

- [1] AutomationML (2017) [website] <http://www.automationml.org>
- [2] Association EF of the FR. Factories of the Future PPP FoF 2020 Roadmap: Consultation document. 2012.
- [3] Binotto APD, Wehrmeister MA, Kuijper A, Pereira CE. Sm@rtConfig: A context-aware runtime and tuning system using an aspect-oriented approach for data intensive engineering applications. Control Eng Pract 2013;21:204-17. doi:10.1016/j.conengprac.2012.10.001.
- [4] Blanchet M, Rinn T, Von Thaden G, de Thieulloy G. Industry 4.0 The new industrial revolution How Europe will succeed. 2014.
- [5] Booch G, Rumbaugh J, Jacobson I. The Unified Modeling Language User Guide (2nd Edition). Addison-Wesley Professional; 2015.
- [6] Botygin IA, Tartakovsky VA. The Development and Simulation Research of Load Balancing Algorithm in Network Infrastructures. Int. Conf. Mech. Eng. Autom. Control Syst., 2014, p. 0-4. doi:10.1109/MEACS.2014.6986904.
- [7] European Commission: Research and Innovation. Factories of the Future PPP: towards competitive EU manufacturing. 2013.

- [8] Guo L, Wang B, Wang W. Research of energy-efficiency algorithm based on on-demand load balancing for wireless sensor networks. *Proc Int Symp Test Meas* 2009;2:22-6. doi:10.1109/ICTM.2009.5413071.
- [9] Estevez E, Marcos M, Gangoiiti U, Orive D. A Tool Integration Framework for Industrial Distributed Control Systems. *Proc. 44th IEEE Conf. Decis. Control, IEEE*; 2005, p. 8373-8. doi:10.1109/CDC.2005.1583518.
- [10] Fay A, Vogel-Heuser B, Frank T, Eckert K, Hadlich T, Diedrich C. Enhancing a model-based engineering approach for distributed manufacturing automation systems with characteristics and design patterns. *J Syst Softw* 2015;101:221-35. doi:10.1016/j.jss.2014.12.028.
- [11] Hästbacka D, Vepsäläinen T, Kuikka S. Model-driven development of industrial process control applications. *J Syst Softw* 2011;84:1100-13.
- [12] Krupitzer C, Roth FM, VanSyckel S, Schiele G, Becker C. A survey on engineering approaches for self-adaptive systems. *Pervasive Mob Comput* 2014;17:184-206. doi:10.1016/j.pmcj.2014.09.009.
- [13] Marcos M, Estevez E, Perez F, Van der Wal E. XML exchange of control programs. *IEEE Ind Electron Mag* 2009;3:32-5. doi:10.1109/MIE.2009.934794.
- [14] Merz M, Frank T, Vogel-Heuser B. Dynamic redeployment of control software in distributed industrial automation systems during runtime. *2012 IEEE Int. Conf. Autom. Sci. Eng., IEEE*; 2012, p. 863-8. doi:10.1109/CoASE.2012.6386445.
- [15] Priego R, Iriondo N, Gangoiiti U, Marcos M. Agent Based Middleware Architecture for Reconfigurable Manufacturing Systems. *Int J Adv Manuf Technol* (2017). doi:10.1007/s00170-017-0154-z. In Press.
- [16] Science N, Council T. *ADVANCED MANUFACTURING: A Snapshot of Priority Technology Areas Across the Federal Government Subcommittee for Advanced Manufacturing* 2016.
- [17] Selic B. The pragmatics of model-driven development. *IEEE Softw* 2003;20:19-25. doi:10.1109/MS.2003.1231146.
- [18] Shen W, Wang L, Hao Q. Agent-based distributed manufacturing process planning and scheduling: a state-of-the-art survey. *IEEE Trans Syst Man Cybern Part C (Applications Rev)* 2006;36:563-77. doi:10.1109/TSMCC.2006.874022.
- [19] Streit A, Rösch S, Vogel-Heuser B. Redeployment of Control Software during Runtime for Modular Automation Systems Taking Real-Time and Distributed I/O into Consideration. *IEEE 19th Conf. Emerg. Technol. Fact. Autom. (ETFA)*, 2014, 2014, p. 1-4.
- [20] SysML. The SysML Specification, v 1.0 2007. <http://www.sysml.org>
- [21] Thramboulidis K, Perdakis D, Kantas S. Model driven development of distributed control applications. *Int J Adv Manuf Technol* 2006;33:233-42. doi:10.1007/s00170-006-0455-0.
- [22] Vogel-Heuser B, Rösch S. Integrated Modeling of Complex Production Automation Systems to Increase Dependability. *Risk - A Multidiscip. Introd.*, 2014, p. 1-476. doi:10.1007/978-3-319-04486-6.
- [23] Vyatkin V, Hanisch H-M. Closed-Loop Modeling in Future Automation System Engineering and Validation. *IEEE Trans Syst Man, Cybern Part C (Applications Rev)* 2009;Vol: 39 pp:17-28. doi:10.1109/TSMCC.2008.2005785.
- [24] ang L, Adamson G, Holm M, Moore P. A review of function blocks for process planning and control of manufacturing equipment. *J Manuf Syst* 2012;31:269-79. doi:10.1016/j.jmsy.2012.02.004.

Estudio e implementación de Middleware para aplicaciones de control distribuido

José-Enrique Simó-Ten, Jose-Luis Poza-Lujan, Juan-Luis Posadas-Yaguë, Francisco Blanes
Instituto de Automática e Informática Industrial (ai2)
Universitat Politècnica de València (UPV).
Camino de vera, s/n. 46022 Valencia (Spain)
jsimo@ai2.upv.es, jopolu@ai2.upv.es, jposadas@ai2.upv.es, pblanes@ai2.upv.es

Resumen

En este artículo se presenta un Middleware (CKMultipeer) desarrollado específicamente para la implementación de sistemas de control distribuido. El objetivo de este desarrollo es disponer de un sistema sencillo, con buenas propiedades sobre el que se puedan ensayar diferentes modelos de implementación tanto de las comunicaciones como de la ejecución de tareas. El Middleware desarrollado, además de permitir profundizar con implementaciones reales y diferentes estructuras de ejecución, se ha utilizado con éxito para la realización de diversas aplicaciones prácticas como es el caso de robots modulares que se han construido por agregación de componentes en red.

Palabras Clave: Control distribuido, Middleware, Publicación/Suscripción, Industria 4.0.

1 INTRODUCCIÓN

De una forma genérica, la tendencia que marca la cuarta revolución industrial, lo que se llama Industria 4.0, es el uso exhaustivo de las comunicaciones por red para la interconexión de componentes, desarrollados de forma independiente y con capacidad de adaptación. El objetivo final al que conduce esta tendencia es al desarrollo de sistemas industriales flexibles, que adapten su funcionamiento a las especificaciones de cada producto en particular y proporcionen y utilicen información de los niveles de planta y logísticos para optimizar la producción. Este objetivo final nos hace comprender que esta revolución está comenzando y queda mucho por hacer. En la actualidad, los fabricantes de automatismos ofrecen soluciones que conectan sistemas MES (*Manufacturing Execution System*) con ERP (*Enterprise Resource Planning*) consiguiendo simplificar la interacción entre el equipo humano y el sistema de producción mediante el uso exhaustivo de las tecnologías de la información. En esta evolución se encuentran

paralelismos con los sistemas de “Internet de las cosas” [1] con los que comparte desafíos relacionados con el procesamiento masivo de la información para la búsqueda de patrones, sistemas de ejecución en la nube, coexistencia de diferentes niveles de criticidad, inestabilidad de las comunicaciones y cuestiones relacionadas con la ciberseguridad.

En este contexto, se pretende aprovechar las sinergias entre los sistemas distribuidos de fabricación y los avances en el campo de las tecnologías de la información.

Con la proliferación de sistemas de control distribuido derivada de la tendencia actual de desarrollo de la “Industria 4.0” es necesario un modelo de desarrollo que simplifique la implementación del conjunto de reguladores distribuidos que compone el control de la planta. En este sentido, este artículo presenta una solución Middleware (CKMultipeer) sencilla que permite ensayar las técnicas de control [2], de gestión de las comunicaciones, ejecución de tareas y monitorización de rendimiento más adecuadas para el desarrollo de sistemas en el marco de la Industria 4.0 e Internet de las Cosas.

2 TRABAJOS RELACIONADOS

Los sistemas distribuidos se implementan normalmente sobre algún tipo de middleware que extiende el marco de ejecución para proporcionar conexión entre dispositivos y mecanismo de intercambio de datos. Se pueden encontrar numerosas soluciones de comunicación tales como MQTT, *Java Message Service* (JMS) [3], *Internet Communication Engine* (ICE) [4], *Common Object Request Broker Architecture* (CORBA) [5], o *Distributed Data System* (DDS) [6]. Algunas de ellas como JMS proporcionan una arquitectura centrada en el mensaje mientras que otras como DDS se centran en los datos. Independientemente del paradigma que se utilice, todas las soluciones proporcionan

mecanismos confiables y flexibles para la comunicación asíncrona. JMS establece un API estándar común restringida al intercambio de mensajes en Java. DDS proporciona un sistema de Publicación/Suscripción independiente de la plataforma. Los entornos ICE y CORBA se basan en el uso de “mediadores de objetos” (Object Request Broker: ORB) que permiten el manejo de referencias a objetos distribuidos. Las soluciones “Common ORB” basadas en el ORB de ACE, TAO [7] que se sustentan sobre el framework ACE (Adaptive Communication Environment) [8]. Para proporcionar al sistema tolerancia a fallos o mecanismos de adaptación es necesario que el middleware tenga mecanismos de monitorización y medida de indicadores de rendimiento. Algunos de las infraestructuras, como la citada TAO o DDS incorporan mecanismos de gestión de la calidad de servicio (QoS) [9]. Tal y como se introduce en [10] el diseño de un mecanismo de tiempo real de gestión de la calidad de servicio requiere la evaluación precisa del rendimiento del servicio y un marco específico para manejar las políticas de calidad de servicio [11].

3 REQUISITOS INICIALES

Como punto de partida, se ha considerado que el Middleware de comunicaciones tenga las siguientes características:

- El modelo de interacción entre elementos es uniforme y permite interacciones entre objetos que se encuentran en el mismo proceso, en diferentes procesos, pero en el mismo computador y entre objetos localizados en diferentes computadores.
- Modelo de comunicación “Publicación/Suscripción”
- Comunicación basada en difusión asíncrona.
- Funciona sobre el protocolo basado en conexión TCP/IP.
- No tiene restricciones sobre el tamaño de la carga útil del mensaje
- Incorpora un servicio de descubrimiento implementado sobre el protocolo sin conexión TCP/UDP. Este protocolo detecta automáticamente los “pares” que forman parte del grupo de comunicación y los agrega para que reciban copia de todos los mensajes. En el caso en que el sistema tenga que funcionar sobre la red que no permita difusión UDP, existirá un elemento “mediador” centralizado que gestionará el grupo, pero no intervendrá directamente en la comunicación.
- La comunicación entre los pares se realiza sin la intervención de componentes

centralizados ni intermediarios. Todos los elementos tienen el mismo rol.

- Ofrece un reloj sincronizado entre todos los pares.
- Los mensajes se envían con una marca de tiempo con resolución de microsegundos.
- Los mensajes se envían con una marca de prioridad de entrega.

4 DESCRIPCIÓN DE CKMultipeer

Tal y como puede apreciarse en la Figura 1, el Middleware está estructurado en tres capas:

- Capa de aplicación
- Capa de sistema
- Núcleo de comunicación

La capa más baja constituye el núcleo de difusión de información. En esta capa se gestionan las conexiones entre los miembros del grupo y la difusión de mensajes al grupo. El formato de los mensajes es el que aparece en la Figura 2. Cuando se recibe un mensaje de red, se identifica el tipo de tráfico y se redirige hacia los puntos de procesamiento adecuados de la capa inmediatamente superior.

En la capa de sistema, se implementan servicios programando manejadores de mensajes que se asocian a determinados tipos de mensajes. De esta forma, se puede usar la misma infraestructura de núcleo de comunicaciones para implementar de forma totalmente separada diferentes servicios.

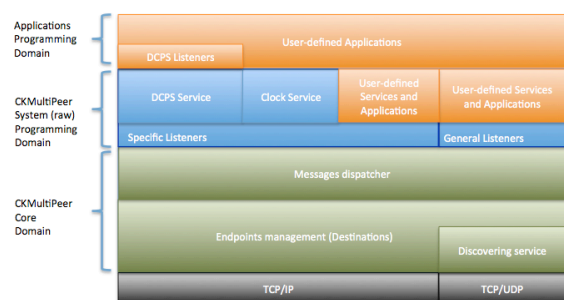


Figura 1: Estructura general de CKMultipeer.

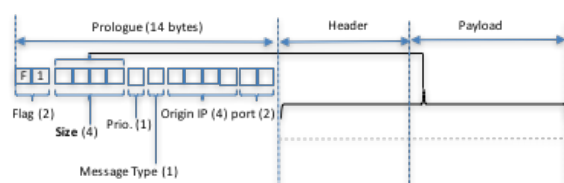


Figura 2: Formato del marco del mensaje.

4.1 NÚCLEO DE COMUNICACIÓN

Tal y como se ha comentado, el núcleo de comunicación se encarga de gestionar las conexiones entre los miembros del grupo, el protocolo de descubrimiento y la propagación de mensajes a través de las conexiones. Desde un punto de vista programático, esta funcionalidad la ofrece un objeto de la clase “MultiPeer”.

4.1.1 Conexiones entre los miembros del grupo

Cada uno de los miembros del grupo mantiene conexiones TCP/IP con el resto de los miembros formado un “mandala” de canales de comunicación bidireccionales. Para formar el entramado de conexiones, cada miembro acepta conexiones por un determinado puerto incorporando para ello un hilo de ejecución “servidor”. Si al intentar crear el socket servidor en un puerto no lo consigue por estar ocupado, lo intentará con el siguiente puerto hasta que lo consigue (máximo 100 intentos). Una vez establecido el puerto por el que el par acepta conexiones, el par establece su identidad como un número de 64bits (GUID) calculado mediante la combinación de la dirección IP (32 bits sin signo) y el puerto en cuestión (16 bits) así: $((IP \ll 16) + \text{puerto})$.

El GUID de un par, además de identificarlo de forma unívoca en la red, se utiliza para establecer un orden entre los pares. Este orden sirve para crear de forma ordenada el entramado de conexiones: simplemente un par con $\text{GUID} = \text{GUID}_{\text{actual}}$ establecerá conexiones con aquellos pares detectados que tengan un GUID mayor que el suyo (más adelante se explicará el mecanismo de descubrimiento de pares) y dejará que los pares con $\text{GUID} < \text{GUID}_{\text{actual}}$ tomen la iniciativa de la conexión.

Las conexiones establecidas de esta manera se mantienen en el objeto “MultiPeer” mediante un conjunto de objetos “Destination” (en la forma de un objeto colección de la clase “PeerSet”). La clase “Destination” ofrece un método público “send()” para enviar mensajes y un método privado “receive()” para recibirlos.

4.1.2 Propagación de mensajes

Cada objeto “Destination” tiene un hilo de ejecución que se bloquea llamando al método “receive()” a la espera de recibir nuevos mensajes por la conexión. Cuando se recibe un mensaje, el hilo del objeto “Destination” invoca al método “OnMessage()” del objeto “MultiPeer” que encola el mensaje en una estructura de múltiples colas (“QueueMessage”). El mecanismo despachador de mensajes del objeto “MultiPeer” se encargará de procesar los mensajes de

esta cola invocando las *callback* de los observadores que se hayan definido (Figura 3).

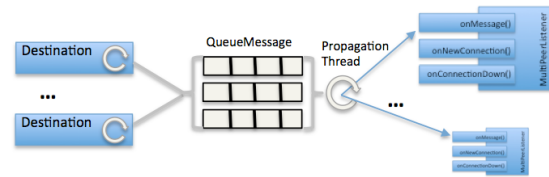


Figura 3: Gestión de los mensajes que se reciben desde las conexiones de red.

De esta forma se consigue simplificar el modelo de planificación de los hilos de ejecución. Por una parte, se ejecutan en el sistema los hilos de procesamiento de las comunicaciones, de alta prioridad, que simplemente mueven la información a las colas de entrada, su ejecución está dirigida por los eventos de comunicación. El hilo de propagación convierte la especificación de ejecución de los manejadores de eventos de comunicación en una ejecución secuencial que puede ser analizada y controlada.

4.1.3 Mecanismo de descubrimiento

Al iniciarse un objeto MultiPeer, establece un canal de difusión *multicast* escogiendo una dirección IP (de tipo “D” desde 224.0.0.0 hasta 239.255.255.255) y un puerto. Esta combinación de IP y puerto de difusión es la “identidad del grupo”. Cada miembro del grupo difunde su identidad enviando su GUID (IP y puerto por el que acepta conexiones como una cadena de caracteres con el formato “XX.XX.XX.XX:PPPP”) por este canal de difusión y recibe la identidad de todos los miembros del grupo por este mismo canal. Cuando un miembro del grupo recibe por el canal la identidad de un nuevo miembro, difunde la suya propia para asegurar que notifica su identidad a los nuevos miembros del grupo. Cuando no hay nuevos miembros en el grupo, el canal de difusión permanece en silencio, no obstante, cada 5 segundos envía su identidad por el canal a modo de “latido de corazón” para comprobar que la infraestructura de red sigue siendo válida.

Cuando un miembro del grupo recibe la identidad de un nuevo miembro, aplica el mecanismo de conexión descrito anteriormente para formar el entramado de conexiones que constituirá la infraestructura de comunicación por la que circulan los mensajes de CKMultipeer.

4.2 CAPA DE SISTEMA

En la capa de sistema es donde se programan los servicios que utilizan el núcleo de comunicaciones. Cada servicio se implementa mediante la definición de uno o más tipos de mensaje y los correspondientes objetos de escucha (*Listeners*) que los procesa. El núcleo de comunicaciones se encarga de encaminar

los mensajes correctamente a los *Listeners* adecuados manteniendo totalmente separado el tráfico e los diferentes servicios.

Actualmente, el servicio más relevante que se ha programado sobre Multipeer es el modelo Publicación/Suscripción “DCPSMultipeer” que se detallará más adelante.

Además de la programación de nuevos servicios, un usuario-programador puede usar directamente la infraestructura Multipeer para difundir datos entre todos los miembros del grupo. Para ello se ha definido el tipo genérico de mensaje “PLAIN”. El siguiente fragmento de código muestra un ejemplo de uso en C++:

```
#include "MultiPeerListener.h"
#include "Message.h"
#include "Destination.h"
#include "Clock.h"

class MPlistenerTest: public MultiPeerListener {
public:
    MPlistenerTest();
    virtual ~MPlistenerTest();
    void onNewConnection(Destination* dest);
    void onConnectionDown(Destination* dest);
    void onMessage(Message* m);
};

MPlistenerTest::MPlistenerTest() {}

MPlistenerTest::~MPlistenerTest() {}

void MPlistenerTest::onMessage(Message* msg) {
    long delay = Clock::currentMicros() - msg->getTimestamp();
    printf("MPlistenerTest: Mensaje recibido (delay = %ld): %s\n",
        delay,
        msg->getBufferPayload());
}

void MPlistenerTest::onNewConnection(Destination* dest) {
    printf("MPlistenerTest: Conexion recibida: %s\n",
        dest->getIPPort()->toString().c_str());
}

void MPlistenerTest::onConnectionDown(Destination* dest) {
    printf("MPlistenerTest: Conexion rota notificada: %s\n",
        dest->getIPPort()->toString().c_str());
}

//----
int main(void) {
    // Setup a MultiPeer Configuration Object
    MultiPeerConf mpCfg;
    mpCfg.setInterfaceName("eth0");
    //Build the communication artifacts
    MultiPeer mp(&mpCfg);

    MPlistenerTest mPl;
    mp.addSpecificListener(MessageType::PLAIN, &mPl);

    IPport *myself = mp.getLocalIPPort();
    unsigned char prio = NORMAL_MESSAGEPRIORITY;

    for(int i = 0; i++) {
        string strMsg = string("Hola Multipeer desde ") +
            mp.getLocalIPPort()->toString() +
            string(" cuenta:") +
            std::to_string(i);

        MessagePlain *msg = new MessagePlain(myself, prio,
            (unsigned char *)strMsg.c_str(),
            strMsg.size()+1);

        mp.send(msg);
        delete msg;
        usleep(100000);
    }
}
```

Como se puede deducir del código que se ha puesto como ejemplo, para programar en la capa de sistema es necesario tener ciertos conocimientos de la estructura interna del núcleo de comunicación y del uso de su API. No obstante, podemos observar que el ejemplo consiste en un programa principal que envía mensajes del tipo PLAIN a través de *Multipeer*, con una cadena de caracteres como carga útil. Al mismo

tiempo establece un *Listener* (objeto de escucha) para este tipo de mensaje. El *Listener* recibe notificaciones cuando llega un mensaje (incluidos los que él mismo envía) y cuando se establece o rompe una conexión.

4.3 CAPA DE APLICACIÓN

La capa de aplicación es donde se desarrollan los módulos de control distribuido utilizando el modelo Publicación/Suscripción que ofrece la capa de sistema. Básicamente se define un módulo de control como un elemento que está interesado en recibir un conjunto de secuencias de datos (identificados mediante un nombre de registro o “Topic”) y que produce un conjunto de resultados publicándolos en una serie de registros (“Topics”).

Los nombres de los registros residen en un espacio de nombres ofrecido programáticamente mediante el objeto “TopicScope” que actúa como factoría de “Topics”. Para poder recibir información de un Topic, es necesario definir un objeto de escucha (TopicListener) y suscribirlo al Topic en cuestión. De una forma abstracta, se construye un sistema distribuido como el que se muestra en la Figura 4

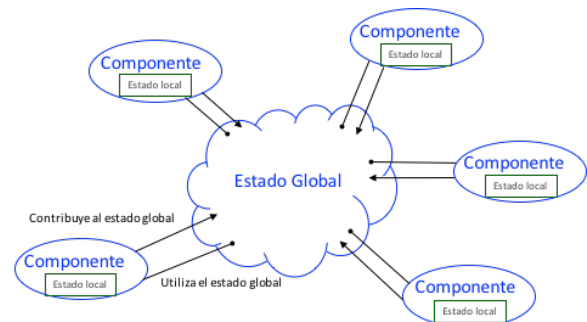


Figura 4: Estructura del sistema distribuido.

A modo de ejemplo, observe el siguiente código en C++:

```
#include "TopicListener.h"
#include "Topic.h"
#include "Clock.h"

class TopicListenerTest: public TopicListener {
public:
    TopicListenerTest();
    virtual ~TopicListenerTest();
    void onMessage(Topic* t, Message* m);
};

TopicListenerTest::TopicListenerTest() {}

TopicListenerTest::~TopicListenerTest() {}

void TopicListenerTest::onMessage(Topic* t, Message* m) {
    long delay = Clock::currentMicros() - m->getTimestamp();
    printf("Topic(%s) %s (delay = %ld) Msg recibido(%ld): %s \n",
        t->getName().c_str(),
        m->getSourceIPPort()->toString().c_str(),
        delay,
        m->getPayloadSize(),
        m->getBufferPayload());
}

//----
int main(void) {
    MultiPeer mp;
    TopicScope scope(&mp);
    Topic *t = scope.lookup("DATA01");
}
```

```

TopicListenerTest TopicListener;
t->addListener(&TopicListener);

char buffer[128];
for(int i = 0; i++) {
    sprintf(buffer, "12345 orden = %d", i);
    t->publish((unsigned char *)buffer, strlen(buffer)+1);
    usleep(50000);
}
}

```

Funcionalmente el código es análogo al que se ha presentado anteriormente. El programa principal publica periódicamente información y se ha definido un objeto de escucha para esta información. En el código se puede observar cómo se define una infraestructura de comunicación (Multipeer) sobre la que se construye un espacio de nombres de datos (TopicScope) que actúa como factoría de “Topics”.

Cuando se publica información en un “Topic”, se notifica, mediante la ejecución del método “OnMessage” a cada uno de los objetos de escucha definidos en el sistema, independientemente de en qué ubicación se encuentren tanto la fuente como la escucha de la información.

4 IMPLEMENTACIÓN DE SOLUCIONES

El modelo descrito permite implementar de forma directa sistemas de control distribuido dirigidos por eventos ya que la infraestructura realiza una gestión transparente de la propagación de los eventos.

El modelo de propagación de eventos es bien conocido y analizable. En un determinado miembro del grupo, cuando se produce un evento, se pueden dar las siguientes posibilidades:

- **Evento local** (se produce en el mismo espacio de direccionamiento)
- **Evento externo** (se produce en espacio de direccionamiento diferente)
 - De un miembro en el mismo host
 - De un miembro localizado en un host remoto

Si el evento es local, el hilo que ejecuta la notificación (llamada a OnMessage) es el mismo que hizo la llamada “publish” sobre el Topic en cuestión. De esta manera se reduce drásticamente la latencia de notificación y se serializan las operaciones a realizar cuando se produce un evento. Con ayuda de la información de auditoría que proporciona el sistema, se es posible determinar la carga computacional que supone la atención a un evento.

Por otro lado, si el evento es remoto, está sujeto a la latencia de las comunicaciones entre procesos del mismo host o la de comunicaciones por red. En este caso el hilo de propagación es el encargado de serializar las operaciones y, análogamente al caso de

eventos locales, es posible analizar la carga computacional con la información que proporciona el sistema.

Si se prefiere programar el sistema mediante procesos periódicos, CKMultipeer ofrece una serie de objetos de ayuda (“PayloadHolder”) que permiten desacoplar la recepción de información de su uso. El siguiente código Java muestra un ejemplo de uso:

```

package dcpsTools;
import dcps.TopicsScope;

public class toolsTest {
    PayloadHolder dataHolder;
    int i = 0;
    public toolsTest() {
        TopicsScope ts = new TopicsScope();
        dataHolder =
            new PayloadHolder(ts.lookup("DATA01"));
        //Set the default value
        dataHolder.setPayload(new String("1425").getBytes());

        PeriodicTask t1 = new PeriodicTask(new Runnable()
        {
            @Override
            public void run() {
                System.out.println("The DATA01 value is: " +
                    new String(dataHolder.getPayload()));
                i++;
            }
        }, 5000000);

        t1.start();
    }

    ///////////////////////////////////////////////////
    public static void main(String[] args) {
        new toolsTest();
    }
}

```

El desarrollo de sistemas sobre CKMultipeer (y en general sobre cualquier middleware de comunicaciones) favorece una alta reutilización de código fuente y, lo que resulta más interesante, la reutilización de componentes ejecutables que se pueden adaptar simplemente configurando sus fuentes y destinos de información. En este sentido se han realizado experiencias de desarrollo de robots reconfigurables uniendo en una red interna del robot con conexión WiFi al exterior del robot, los siguientes elementos: Cámara, Xtion, IMU, Sensores IR, Control de motores, Unidad de navegación, y control de servos. Algunos de estos módulos se ejecutan sobre computadores convencionales pero la mayoría de ellos lo hacen sobre sistemas empotrados basados en Linux del tipo BeagleBone y RaspberryPi.

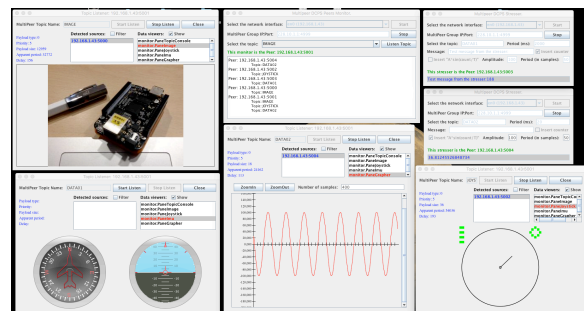


Figura 5: Herramientas de monitorización y visualización de información de CKMultipeer.

Actualmente existen implementaciones del sistema descrito (CKMultipeer) tanto en lenguaje C++ como Java, así como diferentes herramientas de monitorización, inyección y visualización de información. Ver Figura 5.

4 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este artículo se ha presentado un middleware de comunicaciones orientado al desarrollo de sistemas de control distribuido. El desarrollo se ha realizado sin ninguna dependencia de código, lo que ha permitido estudiar las estructuras de ejecución y propagación de información más adecuadas para los propósitos del sistema.

Hemos comprobado que la versión actual del middleware permite desarrollar sistemas flexibles y reconfigurables en la línea de los objetivos establecidos en la tendencia de “Industria 4.0”. No obstante, quedan por desarrollar importantes funcionalidades relacionadas con la gestión de la Calidad de Servicio y la inclusión de meta-información y su semántica asociada.

Las pautas de programación y los objetos de ayuda desarrollados permiten que se piense en herramientas de generación automática de código que no existen actualmente pero que se tiene previsto desarrollar en un futuro.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Gobierno de España (MICINN) a través del proyecto: M2C2: “Codiseño de sistemas de control con criticidad mixta basado en misiones” TIN2014-56158-C4-4-P.

Referencias

- [1] Soma Bandyopadhyay, Munmun Sengupta, Souvik Maiti, and Subhajit Dutta. A survey of middleware for internet of things. In *Recent Trends in Wireless and Mobile Networks*, pages 288–296. Springer, 2011.
- [2] Eduardo Munera, Jose-Luis Poza-Lujan, Juan-Luis Posadas-Yagüe, Jose Simo, J Francisco Blanes, and Pedro Albertos. Control kernel in smart factory environments: Smart resources integration. In *Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, 2015 IEEE International Conference on, pages 2002–2005. IEEE, 2015.
- [3] Mark Hapner, Rich Burrige, Rahul Sharma, Joseph Fialli, and Kate Stout. Java message service. Sun Microsystems Inc., Santa Clara, CA, page 9, 2002.
- [4] M Henning and M Spruiell. Distributed programming with ice. Technical report, ZeroC Inc., 2003.
- [5] Object Management Group (OMG). The Common Object Request Broker (CORBA): Architecture and Specification. Technical report, Object Management Group, 1995.
- [6] Object Management Group (OMG). Data Distribution Service for Real-time Systems. Version 1 edition, 2007.
- [7] DC Schmidt. TAO, The Ace Orb. Technical report, DOC group, Washington University, 2007.
- [8] DC Schmidt. The adaptive communication environment. Technical report, DOC group, Washington University, 1994.
- [9] Cristina Aurrecoechea, Andrew T Campbell, and Linda Hauw. A survey of qos architectures. *Multimedia systems*, 6(3):138–151, 1998.
- [10] Woonchul Kang, Sang Hyuk Son, and John A Stankovic. Design, implementation, and evaluation of a qos-aware real-time embedded database. *Computers, IEEE Transactions on*, 61(1):45–59, 2012.
- [11] José L Poza, Juan L Posadas, and José E Simó. From the queue to the quality of service policy: A middleware implementation. In *International Work-Conference on Artificial Neural Networks*, pages 432–437. Springer, 2009.

Real-Time Image Mosaicking for Mapping and Exploration Purposes

Abdulla Al-Kaff, Juan Camilo Soto Triviño, Raúl Sosa San Frutos,
Arturo de la Escalera and José María Armingol Moreno

Intelligent Systems Lab, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, Spain
akaff@ing.uc3m.es, camilosotto@gmail.com, rsosasanfrutos@gmail.com,
escalera@ing.uc3m.es armingol@ing.uc3m.es

Abstract

In the last decade, building mosaic images become an active field in several computer vision and graphic applications. In this paper, a panoramic image construction using monocular camera is proposed. In this approach, SURF algorithm is used to extract the keypoints in order to obtain reliable results for real-time applications. In addition, based on the homography between the panoramic and the new image, the rotation matrix is obtained, and the new image can be projected on a plane parallel to panorama. Finally, image illumination is compensated over the whole image and the calculation of the pixels contributed by each frame in the overlapping areas. The proposed approach has been verified with real flights, and the obtained results show the robustness of constructing panoramic image with minimal losing in the information, furthermore, the results prove the ability of the proposed approach to create panoramic images in real-time applications.

Keywords: Image mosaic; Panorama; UAV; Exploration; Mapping.

1 INTRODUCTION

The field of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) has been typically limited to and supported by the defense and military industries, this is due to the cost and the complexity of designing, building and operating these vehicles. Recently, with the developments in microelectronics and the increase of computing efficiency, micro unmanned aerial vehicles (MAVs) have encountered a significant focus among the robotics research community. Moreover, because of their ability to operate in remote and dangerous situations, Vertical Take-Off and Landing (VTOL) rotor-craft systems are increasingly used in several civilian and scientific applications; such as surveying and mapping, rescue operation in disasters [1, 2], spatial information acquisition, inspection [3, 4], animal protection [5], agricultural crops monitoring [6], or manipulation and transportation [7]. These capabilities proposed the advantage to substitute the human operators in the risky and hazard environments.

Aerial imagery or aerial filming is considered one of the basic and demanding application; such as filming sports games and events. With the advances in computer vision algorithms and sensors, the concept of using aerial images just for photography and filming was changed to be used widely in more complex applications; such as thematic and topographic terrains mapping [8, 9]; exploration of unreachable areas; such as rivers [10] or forests [11]; surveillance purposes [12].

One of the main tasks in infrastructure inspection and topographical mapping missions is the construction of a panoramic image; in order to cover the whole area under inspection. For this purpose, image mosaicking is required for stitching all the image sequence, and the resulting panoramic image should be as most as possible to the original images without losing any information.

In this paper, a panoramic reconstruction approach for real-time applications, based on monocular images is proposed. This method builds panoramas of infrastructure surfaces and aerial images based on the displacements of the camera. The reconstruction is created by adding the latest captures image to the resulting panorama. This approach is based on the homography estimated from the matched feature points between the panoramic and the new image. Thereafter, the rotation matrix is obtained, and the new image can be projected on a plane parallel to the one of the resulting panorama. The scale and positioning of the latest frame is obtained by comparing the pixels of the feature points. The step prior to the final smooth stitching, is the illumination compensation over the whole image and calculation of the pixels contributed by each frame in the overlapping areas.

The remainder of this paper is organized as follows; section 2 introduces the state-of-the-art work related to image mosaicking. Section 3 presents the proposed image mosaicking algorithm, then section 4 discusses the experimental results. Finally, in section 5 conclusions are summarized.

2 RELATED WORK

There are a number of related works that have similar applications to the proposed approach, nevertheless, they all have slight differences. In this section, these works are depicted and analyzed in detail pointing out the strengths and weaknesses of each one of them compared to the proposed approach.

This section is divided into two subsections; in the first one, a review of how regular panoramic images are usually formed. The second one focuses on image mosaic from UAVs to form land views from the sky as well as of large building structures. Additionally, the main differences of these methods to the proposed approach is identified.

2.1 PANORAMIC IMAGES

The panoramas build large and detailed images from several overlapping frames of the same scene [13]. Generally, panoramic images form the mosaic under the assumption of a rotating camera on a fixed position. This means that the matrix transformation of the image is the same in all the captures. Comparing this to the proposed approach, it is noted that it is the key aspect that differs from these methods. However, similar to the other works, the proposed approach assumes all the images are in the same plane.

The works reviewed explain the main steps taken to create a panoramic image [14, 15], or a 360° immerse view [16]. The basic steps carried out to create an image panorama are the following: firstly the overlapping area is detected, from this area, the blending of two frames is created consecutively in a seamless manner.

The main challenges encountered by these articles in the formation of an image mosaic are the following: large amount of data, noise, camera and object motion, vignetting and lens distortion.

2.2 IMAGE MOSAIC IN UAVS

Mosaic from aerial images differs from panoramic images in the aspect mentioned before - all the images are in the same plane. Some image mosaicking techniques presented in [17, 18, 19, 20, 21].

The general steps for automatic image mosaicking are: image pre-process, feature extraction and matching, transformation model construction, transformation coordinate unification and image stitching [17]. The algorithms used to form a panorama from aerial images, usually used for ortho-mapping [18], however, these techniques are used in the formation of panoramic images of buildings and structures for construction and survey purposes.

One algorithm for automatic image mosaicking is proposed in [19], at which, the mosaic from the Unmanned Aerial Vehicle Images (UAVI) are generated; according to the following steps: Frame preprocessing, feature point detection and multi scene stitching.

Image mosaic is also produced based on Structure From Motion (SFM) methods [20]. The steps are similar to the previous work, using SFM for the camera parameters and 3D coordinate calculations.

Similarly, for long-term mosaicking, a radial distortion accumulates error, in [21], a iterative algorithm based on geometrical constraints is proposed; to compensate this error and create panoramas with more than 1500 frames.

Additionally, Eschmann *et al* presented an algorithm; where a multi-copter creates a panorama of a building as well as including a crack detection system based on computer vision [22]. The process is divided into two stages: data acquisition and digital post-processing. In the data acquisition phase, the UAV is controlled manually because this process relies on GPS data, which is insufficient for near buildings flights. Besides, the data for the further image stitching can be collected either automatically, with a given rate, or manually where certain parameters as the zoom may be adjusted. Furthermore, for a proper performance of the algorithm, the UAV must follow a predefined pattern of horizontal strips.

3 PROPOSED ALGORITHM

In order to understand the sequence used to create the panoramic image, it is necessary to comprehend the methods, formulas and assumptions behind this project. The algorithm is developed for objects such like large structures or buildings, although it may also be used for ground reconstruction. Ideally, the camera should stay parallel to the planar object being studied, without rotating and keeping the same distance to it. Later, this supposition will not be maintained as there is some noise coming from the UAV flight. This noise will be treated by transforming the images.

The proposed panoramic image reconstruction is designed to be on-board since a live monitoring reconstruction is possible as well as for time saving issues; Moreover, an on-board reconstruction could be used as part of the control system, where the variations measured from consecutive images could help to understand the UAV recent trajectory. Furthermore, with the method proposed in this paper off-board panorama reconstruction from a flight video is also possible.

In this section the main steps of the algorithm are detailed, including explanation of how the maths behind each step work. Firstly, a matching between two preprocessed images is done to find common key aspects in successive frames, from this key aspects the homography matrix is determined. From the decomposed homography, rotation and translation are obtained. Thereafter, the image wrapping is used to overcome the UAV rotation and relative movement over the image. Next, with the obtained data the images are blended forming a panoramic image. This process is repeated using the area of interest of the resultant image and the following frame until the final panorama is created.

3.1 Image Matching

Both images are taken from the same camera in two different reference systems denominated: the first frame and the second frame. After this, the matching points are computed between the panoramic image and the next image.

The first step is the matching, a set of feature points are detected in each image, this features are image points denominated keypoints. For the set of keypoints, a set of vectors are defined mathematically that interprets the features of each keypoint. This vectors are designated as descriptors and are used to find equivalences between images. The correct equivalences are treated as inliers.

In this work, SURF algorithm is used to detect the keypoints and extract the descriptors for two reasons: it is a robust method as shown in [23], and from the methods used this the one gave the best results achieving a greater number of inliers in the shortest time.

The matching algorithm implemented is based on Fast Library for Approximate Nearest Neighbors (FLANN) [24]. This finds the two best matches for each descriptor, and sorts them by distance. This distance is then used to determine whether the match is suitable or not. From the valid matches, the homography matrix is then estimated.

3.2 Homography Matrix

To understand how the homography works, it is important to explain the notation used in this paper. The maths used calculating the homography are based on the methods seen in [25].

In Figure 1, the two frames in front the planar object are noted, where the second frame has been rotated and translated with respect to the first one, and where the first coordinate system axes are configured in an ideal angle. The homogeneous transformation matrix that allows to convert a 3D

vector from the first to the second frame is:

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} {}^1R_2 & {}^1t_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

This matrix is composed of the 3-by-3 rotation matrix 1R_2 and the 3D translation vector 1t_2 . The two frames have the same optical center when the translation vector is the zero vector, on the other hand, when the rotation matrix is an identity matrix, the axes of the two frames would be parallel to each other.

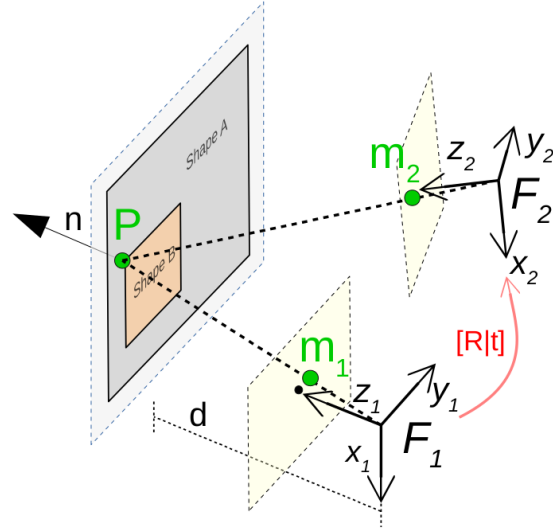


Figure 1: Point representation in two frames

The denotation of a 3D point within the planar object referred to the first and the second frame is P_1 and P_2 respectively. This point is normalized as follows:

$$m_1 = \left(\frac{x_1}{z_1}, \frac{y_1}{z_1}, \frac{z_1}{z_1} \right) = (x'_1, y'_1, 1) \quad (2)$$

$$m_2 = \left(\frac{x_2}{z_2}, \frac{y_2}{z_2}, \frac{z_2}{z_2} \right) = (x'_2, y'_2, 1) \quad (3)$$

This normalized coordinates are used to obtain the image coordinates in pixel using the following transformation:

$$p = Km \quad (4)$$

where $k = \begin{bmatrix} f_x & 0 & o_x \\ 0 & f_y & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ is the intrinsic parameters matrix which is calculated in the camera calibration, where, (f_x, f_y) are the camera focal lengths and (o_x, o_y) are the optical center. The transforming from the normalized to the image coordinates is done using the following equations:

$$u_1 = f_x \cdot x'_1 + o_x \quad (5)$$

$$v_1 = f_y \cdot y'_1 + o_y \quad (6)$$

As a result of the operations, $(u_1, v_1, 1)$ are the vector coordinates of a pixel in the first image,

and $(u_2, v_2, 1)$ are the vector coordinates in the second image, each of the pixels is relative to the top left corner. The following equation is used to convert the coordinate vector of the second image p_2 to the coordinate vector of the first image p_1 :

$$s \cdot p_1 = \gamma k H k^{-1} p_2 \quad (7)$$

where s is a scale factor and H is the Euclidean homography matrix:

$$H = {}^1R_2 + \frac{{}^1t_2}{d_2} n^T \quad (8)$$

3.3 Image Warping

To eliminate the noise produced by the rotation of the camera, the translation matrix is considered as the zero vector to transform the second image points. Each point in the second image is remapped, using a linear interpolation, with the Equation:

$$p_2'' = s \cdot p_2' \quad (9)$$

where,

$$p_2' = k({}^1R_2)k^{-1}p_2 \quad (10)$$

From Equation 10, the points are transformed if the second frame axes were parallel to the first frame axes, but the image shapes does not have the same scale. Therefore, before transforming all the points, it is necessary to obtain the scale factor s of this transformation.

To get s , first of all, two pairs of matched points are selected (the two furthest). Secondly, the two inliers points of the second image are transformed using the Equation 10. Finally, the distances between the two first image inliers and the transformed inliers are measured and compared as follows:

$$s = \frac{l_1}{l_2} \quad (11)$$

where l_1 is the distance between two furthest inliers points in the first image and l_2 is the distance referred to the second image but with the points transformed.

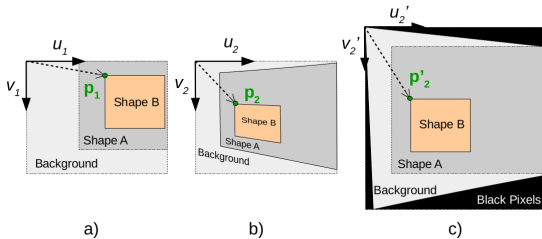


Figure 2: Image warping; a) Observed shapes from the first frame, b) Observed shapes from the second frame, and c) Second image converted by the Equation 9

3.4 Exposure Compensation

It is important to adjust the exposure between the two overlapping images before finding the seams; because although both images have common features, the exposure difference between both could be high and the brightness difference is noticed in whole panorama. Furthermore, the adjustment could help the seams search because a large exposure difference confuses the algorithm.

This technique is based on the division of an input image in different blocks, see [26]. Each block is compared in the luminescence sense with the image which is overlaid by the block. This method computes a quadratic transfer function for each block. Thereafter, the transfer functions of the neighboring blocks are averaged to smooth the variation of the functions distribution. Finally, the result of each pixel is obtained through a linear interpolation from neighboring patches of the input image.

In this process, a Region of Interest (ROI) is used as the first frame in order to reduce the computational time, this is explained in further detail in section 4.

3.5 Seam Finder

As a seam finder between the two images, a method based on the graph cut problem [27] is used. For the blending, the minimum graph cutting cost is calculated and applied in the overlapping region.

To apply the graph cut algorithm, first of all, each pixel within the overlapped area is defined as a node. The first image and second image are the patch A and B respectively. After, the adjacent pixels are connected with a arc. Each arc is labeled with the equation $M(s, t, A, B)$ called matching quality cost:

$$M = \|A(s) - B(s)\| + \|A(t) - B(t)\| \quad (12)$$

where s and t are the position of two adjacent nodes and where A and B are the pixel color in the different patches. For instance, $B(s)$ is the s pixel color in the B patch.

Finally, the arcs connected to a pixel outside the overlapping region are labeled with an infinitely high cost. Then, the graph cut problem is solved by drawing the path dividing both patches. This can be seen in Figure 3, where the red line represents the path, resulting in the pixels from the left area being copied from the patch A and the ones in the right from the B.

3.6 Feather Blending

For the blending of the two frames, a Feather-blending method is used; Originally multiband-

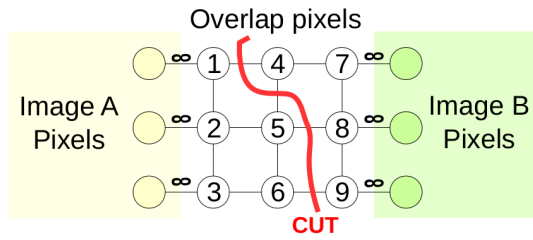


Figure 3: Path found by the graph cut algorithm

blending was used, however in the case presented it was identified that the solution obtained with feather-blending was more optimal as the Gaussian filter implemented in the original approach blurred the image. The method is based on a variation of weights given to the pixels of each image depending the distances from the edges [28].

To achieve the stitched image, it is necessary to know the input image positions in the output image. To do that, the image corners should be computed. The corner constitutes the top left point of each image and in the case of the first image it is the vector $(0,0)$ and in the second image it is calculated relatively to the first image corner. The second image corner is obtained following a set of steps. First at all, warp the corner of the second image using Equation 10 and a inlier point, getting the warped points c'_2 and i'_2 . After, determine the difference between a first image inlier coordinates and the corresponding warped inlier coordinates of the second image, getting the translation vector (t_x, t_y) in pixels. The components of the resulting corner are the sum of the warped corner plus the obtained translation vector.

Eventually, with the corners of the images that are stitched and the size in pixels of them, it is possible used the feather-blending method to obtain the panoramic image.

4 Experimental results

In this section, the real flight tests are performed in order to evaluate the proposed algorithm. In addition, the panorama for the initial tests is created from aerial images dataset taken from [29].

The initial test seek to find the optimal overlapping percentage between consecutive frames, so various datasets were tested at 50% and 80% overlap using the time and the quality of the image to evaluate the results. For the dataset of a neighborhood, seen in Figure 5 a panoramic at 80% overlap is composed using a total of 10 frames, as well as a panoramic at 50% overlap with 4 frames; it is noteworthy the fact that the same area is being covered in all tests. Additionally, a large panoramic image is shown from the stitching of 15 aerial frames, Figure 4.

The illumination compensation is also analyzed to determine the optimal approach to form the mosaic: compensating the changes in illumination over the whole image, over the section being analyzed or not including an illumination compensation at all.

Moreover, in the experiment done, a comparison of the computational time for the different sections of the algorithm is evaluated, analyzing the benefits of including the ROI and the exposure compensation.

4.1 Platform

In the experiments, DJI F450 quadcopter based on Pixhawk control system was used. The quadcopter is equipped with SJ4000 wireless camera that provides images of 640×480 pixels, mounted on Tarot G-2D gimbal to provide stability of the camera. The processing in the ground station is performed in Intel i5-2410M at 2.3 GHz CPU and 4 GB RAM. The connection with the UAV is established via a standard 802.11n wireless LAN card.

4.2 Results

In this subsection, the results are shown and analyzed, Figure 6 presents the final panoramic image created from aerial frames of a city with a 60% overlap.

From the analysis of the optimal overlapping percentage seen in Figure 5 it is observed that a 50% overlap gives a better result in the following aspects: a clearer image is obtained since fewer pixels are transformed every time the blending is applied, the panoramic image is created with reduced errors as there are less seams (see Figure 3), the computational time is reduced as the process is executed fewer times, and exposure compensation works better at lower overlapping area producing darker images at 80% overlap due to the compensation being applied more times. However, a possible drawback of using a low overlap as 50% would result in a lack of inliers found in images with a small number of key features. This would cause a failure in the mosaicking, nevertheless this has not been observed in the executed tests with the exception of the top-right corner of Figure 5 where the panoramic image presents the repetition of some features of the image due to the lack of matching features between consecutive frames. For this reason, it is concluded that the optimal overlapping percentage is slightly higher than 50%, so a 60% overlapping is used in the demonstration of the algorithm seen in Figure 4.

The exposure compensation for the panorama produces better results with large caption areas, i.e. when there is a considerable variation in illumi-

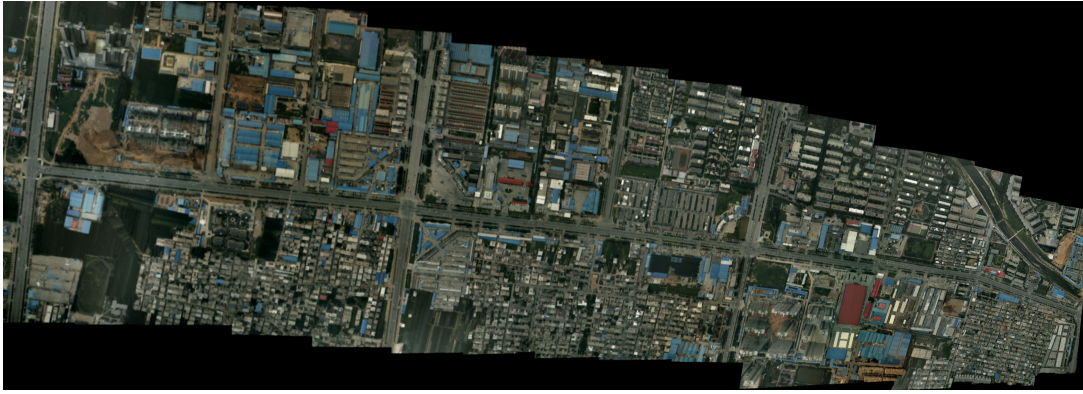


Figure 4: Mosaicking from aerial images

nation between some of the frames and others. Hence, the exposure compensation is beneficial for panoramas with large area covered, whereas in cases where the area covered is reduced, greater results are obtained without applying this compensation.

The use of the ROI improves the computational time of the algorithm without influencing the quality of the image. From Table 1 it is observed how the total computational time is reduced from 1.0245s to 0.9275s simply by the addition of a ROI.

Table 1 shows the computational time for the different sections of the algorithm. The times shown in this table represent the time taken for each individual section in the stitching of two frames. As the panoramic image grows, the times remain constant fluctuating depending on the number of keypoints detected in the pair of frames. These results are taken from the second stitching of the image in Figure 5b.

Table 1: Table showing times for each process in the image blending

Panoramic Steps	Time (s)
Detection & Matching	0.5246
Image warping	0.0302
Exposure compensation	0.0572 (0.1542)
Seam finder	0.2860
Blending	0.0287
Total	0.9275 (1.0245)

Note: numbers in parenthesis represent the occasions when the ROI is not applied.

5 Conclusion

In conclusion, this paper presents an algorithm capable of generating a panorama from aerial images, it can be observed the good set of results. Moreover, it is exposed from the results the benefits of including a ROI when compensating the illumination in the frames, as well as the fact

that this compensation makes an effect when the panorama covers a large area. Furthermore, for the formation of the image mosaic, it is beneficial to use an overlapping of 60% since the computational time saved is significant as well as creating superior images.

During the experiment there were a series of problems encountered, some of which have been resolved and some are analyzed to solve in future works:

- The number of keypoints detected in smooth/dark surfaces created ghosting, which meant that some objects were missing from the final panorama.
- Multi-bland blending uses Gaussian filters over the whole panorama, blurring the image, hence Feather blending is used instead.
- The first image must be parallel to the structure being analyzed since, a failure to do this creates accumulated error as every image takes the coordinate system of the original.
- The concentration of keypoints on a specific area means that the homography produced is incorrect due to lack of information in the frames, hence keypoints must be scattered around the image.

From the problems encountered, it is determined that the use of Lucas-Kanade tracking for keypoint matching could potentially improve the results obtained from the proposed algorithm. Henceforth the next step to improve the algorithm would be to include the keypoint tracking, which would solve the issues experienced during the initial tests.

Moreover, as mentioned before, the original goal is to mount the camera on a UAV and to reconstruct the mosaic in real-time. Once, the code has been improved this would be a feasible task as it is a



(a) Panoramic at 60% overlap

(b) Panoramic at 80% overlap

Figure 5: Image mosaic of a neighborhood at different overlapping percentages

fast and robust algorithm capable of running in real time.

Acknowledgments

Research supported by the Spanish Government through the CICYT projects (TRA2015-63708-R and TRA2016-78886-C3-1-R), and the Comunidad de Madrid through SEGVAUTO-TRIES (S2013/MIT-2713).

References

- [1] G.-J. M. Kruijff, V. Tretyakov, T. Linder, F. Pirri, M. Gianni, P. Papadakis, M. Pizzoli, A. Sinha, E. Pianese, S. Corrao, and others, "Rescue robots at earthquake-hit mirandola, italy: a field report," in *Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2012 IEEE International Symposium on*. IEEE, 2012, pp. 1–8.
- [2] D. Erdos, A. Erdos, and S. Watkins, "An experimental UAV system for search and rescue challenge," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 28, no. 5, pp. 32–37, May 2013.
- [3] S. Choi and E. Kim, "Image Acquisition System for Construction Inspection Based on Small Unmanned Aerial Vehicle," in *Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering*. Springer, 2015, pp. 273–280.
- [4] A. Al-Kaff, F. M. Moreno, L. J. San José, F. García, D. Martín, A. de la Escalera, A. Nieva, and J. L. Meana García, "VBII-UAV: Vision-based infrastructure inspection-uav," in *World Conference on Information Systems and Technologies*. Springer, 2017.
- [5] J. Xu, G. Solmaz, R. Rahmatizadeh, D. Turgut, and L. Boloni, "Animal monitoring with unmanned aerial vehicle-aided wireless sensor networks," in *Local Computer Networks (LCN), 2015 IEEE 40th Conference on*. IEEE, 2015, pp. 125–132.
- [6] D. Anthony, S. Elbaum, A. Lorenz, and C. Detweiler, "On crop height estimation with UAVs," in *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), 2014 IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE, 2014, pp. 4805–4812.
- [7] N. Michael, J. Fink, and V. Kumar, "Cooperative manipulation and transportation with aerial robots," *Auton Robot*, vol. 30, no. 1, pp. 73–86, Jan. 2011.
- [8] L. Ma, M. Li, L. Tong, Y. Wang, and L. Cheng, "Using unmanned aerial vehicle for remote sensing application," in *Geoinformatics (GEOINFORMATICS), 2013 21st International Conference on*. IEEE, 2013, pp. 1–5.
- [9] W. Tampubolon and W. Reinhardt, "UAV Data Processing for Large Scale Topographical Mapping," *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-5, pp. 565–572, Jun. 2014.

- [10] S. Rathinam, P. Almeida, Z. Kim, S. Jackson, A. Tinka, W. Grossman, and R. Sengupta, "Autonomous searching and tracking of a river using an UAV," in *American Control Conference, 2007. ACC'07.* IEEE, 2007, pp. 359–364.
- [11] C. Yuan, Z. Liu, and Y. Zhang, "UAV-based forest fire detection and tracking using image processing techniques," in *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2015 International Conference on.* IEEE, 2015, pp. 639–643.
- [12] L. T. Lilien, L. b. Othmane, P. Angin, B. Bhargava, R. M. Salih, and A. DeCarlo, "Impact of Initial Target Position on Performance of UAV Surveillance Using Opportunistic Resource Utilization Networks." IEEE, Sep. 2015, pp. 57–61.
- [13] S. Pravenaa and R. Menaka, "A methodical review on image stitching and video stitching techniques," *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 11, no. 5, pp. 3442–3448, 2016.
- [14] M. Alomran and D. Chai, "Feature-based panoramic image stitching," in *Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV), 2016 14th International Conference on.* IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [15] R. Szeliski, "Image alignment and stitching: A tutorial," *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision*, vol. 2, no. 1, pp. 1–104, 2006.
- [16] F. E. Sandnes and Y.-P. Huang, "Translating the viewing position in single equirectangular panoramic images," in *Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2016 IEEE International Conference on.* IEEE, 2016, pp. 000 389–000 394.
- [17] R. B. Inampudi, "Image mosaicing," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, 1998. IGARSS'98. 1998 IEEE International*, vol. 5. IEEE, 1998, pp. 2363–2365.
- [18] D. Wei and G. Zhou, "Real-time uav ortho video generation," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International*, vol. 5. IEEE, 2008, pp. V–510.
- [19] X. Yin and N. Ma, "Study on the automatic unmanned aerial vehicle image mosaic algorithm," in *Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), 2011 2nd International Conference on*, vol. 2. IEEE, 2011, pp. 624–628.
- [20] H. Wang, J. Li, L. Wang, H. Guan, and Z. Geng, "Automated mosaicking of uav images based on sfm method," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International.* IEEE, 2014, pp. 2633–2636.
- [21] H. Meuel, S. Ferenz, M. Munderloh, H. Ackermann, and J. Ostermann, "In-loop radial distortion compensation for long-term mosaicing of aerial videos," in *Image Processing (ICIP), 2016 IEEE International Conference on.* IEEE, 2016, pp. 2961–2965.
- [22] C. Eschmann, C. Kuo, C. Kuo, and C. Boller, "Unmanned aircraft systems for remote building inspection and monitoring," in *6th European workshop on structural health monitoring*, 2012, pp. 1–8.
- [23] Z. Pusztai and L. Hajder, "Quantitative comparison of feature matchers implemented in opencv3," 2016.
- [24] M. Muja and D. G. Lowe, "Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration." *VISAPP (1)*, vol. 2, no. 331–340, p. 2, 2009.
- [25] E. Malis and M. Vargas, "Deeper understanding of the homography decomposition for vision-based control," Ph.D. dissertation, INRIA, 2007.
- [26] M. Uyttendaele, A. Eden, and R. Szeliski, "Eliminating ghosting and exposure artifacts in image mosaics," in *Computer Vision and Pattern Recognition, 2001. CVPR 2001. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on*, vol. 2. IEEE, 2001, pp. II–II.
- [27] V. Kwatra, A. Schödl, I. Essa, G. Turk, and A. Bobick, "Graphcut textures: image and video synthesis using graph cuts," in *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, vol. 22, no. 3. ACM, 2003, pp. 277–286.
- [28] P. J. Burt and E. H. Adelson, "A multiresolution spline with application to image mosaics," *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 2, no. 4, pp. 217–236, 1983.
- [29] M. Xia, J. Yao, R. Xie, L. Li, and W. Zhang, "Globally consistent alignment for planar mosaicking via topology analysis," *Pattern Recognition*, vol. 66, pp. 239–252, 2017.

ALGORITMO DE SLAM UTILIZANDO APARIENCIA GLOBAL DE IMÁGENES OMNIDIRECCIONALES

Yerai Berenguer, Luis Payá, Mónica Ballesta, Luis M. Jiménez, Sergio Cebollada y Oscar Reinoso

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Miguel Hernández University, Spain

{yberenguer, lpaya, m.ballesta, luis.jimenez, sergio.cebollada, o.reinoso}@umh.es

Resumen

Este trabajo presenta un algoritmo SLAM para estimar la posición y orientación de un robot móvil al mismo tiempo que crea un mapa del entorno. Utiliza solo la información visual proporcionada por un sistema catadióptrico montado en el robot, formado por una cámara que apunta hacia un espejo convexo, que proporciona al robot imágenes omnidireccionales que contienen información con un campo de visión de 360 grados alrededor del eje central del espejo. Cada imagen omnidireccional adquirida por el robot se describe utilizando descriptores de apariencia global, que permiten ejecutar nuestro algoritmo en tiempo real gracias a su compacidad. El método consta de tres pasos diferentes. En primer lugar, el robot calcula su posición y orientación, y crea un nuevo nodo en el mapa, el cual está formado por nodos conectados entre ellos. En segundo lugar, detecta cierres de bucle entre el nuevo nodo y los nodos del mapa. Finalmente, el mapa se optimiza utilizando un algoritmo de optimización y los cierres de bucle detectados. Se han utilizado dos conjuntos diferentes de imágenes para probar la eficacia del método, los cuales fueron capturados en dos entornos reales. Los resultados de los experimentos muestran la eficacia de nuestro método.

Palabras clave: SLAM, Apariencia Global, Imágenes Omnidireccionales

1. INTRODUCCIÓN

El SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) se ha considerado como una de las tecnologías más importantes en la investigación de la robótica móvil durante los últimos años [1, 2]. Muchos de estos trabajos se centran en el uso de información visual para desarrollar algoritmos de SLAM, debido a la rica información proporcionada por los sensores visuales.

Además de esto, los sensores visuales se pueden configurar de diferentes maneras como cámaras convencionales, sistemas estéreo, matrices de cámaras o sistemas catadióptricos. Esta última configuración está formada por una cámara apuntando hacia un espejo convexo [3]. La imagen resultante capturada por este último tipo de cámara contiene información sobre un campo de

visión de 360 grados alrededor del eje del espejo de la cámara. Esto proporciona imágenes omnidireccionales.

En el campo del SLAM, las imágenes omnidireccionales tienen multitud de ventajas gracias a su campo de visión, ya que una sola imagen contiene información de todos los alrededores del robot. Podemos encontrar muchos trabajos previos que usan imágenes omnidireccionales en tareas de creación de mapas y localización. Por ejemplo, Valiente et al. [4] presenta una comparación entre dos métodos visuales SLAM diferentes usando imágenes omnidireccionales y Garcia et al. [5] muestra una recopilación de métodos de creación de mapas y localización basados en visión por computador.

Tradicionalmente, las investigaciones sobre robots móviles que utilizan sensores visuales se basan en la extracción y descripción de algunos puntos característicos de las escenas, como descriptores SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) [6] y SURF (Speeded-Up Robust Features) [7]. Este enfoque presenta algunas desventajas: el tiempo computacional para calcular y comparar los descriptores suele ser alto, y conduce a algoritmos de localización y creación de mapas relativamente complejos. Como ventaja, sólo se necesitan algunas posiciones almacenadas en el mapa para hacer posible el proceso de localización.

Más recientemente, algunos autores proponen utilizar la información global para describir las escenas, creando un descriptor único por imagen. Estas técnicas han demostrado ser una buena opción para resolver los problemas de localización y navegación cuando el movimiento del robot está contenido en el plano del suelo. Por ejemplo, Chang et al. [8] presenta un sistema de navegación y localización basado en la visión que utiliza el descriptor *gist*. Payá et al. [9] utilizan un descriptor basado en la firma de Fourier para realizar tareas de localización usando un algoritmo Monte Carlo, y Wu et al. [10] proponen un método de detección de cierre de bucle visual de manera eficiente. En [11], se analizan y comparan varios métodos para obtener descriptores globales de escenas panorámicas y se demuestra su validez en la construcción de mapas y la localización. La mayoría de estos descriptores de apariencia global se pueden usar en tiempo real porque el

tiempo computacional para calcularlos y manejarlos es bajo, y generalmente llevan a algoritmos de creación de mapas y localización más directos.

Habitualmente, el proceso de creación de mapas produce un error en cada posición del mapa debido al cálculo iterativo de nuevas poses (posición y orientación) del robot. Esto puede ser un gran problema en entornos extensos cuando el robot tiene que calcular muchas poses nuevas, ya que el error está aumentando en cada iteración. Esta incertidumbre puede reducirse mediante la detección de cierres de bucle y el uso de algoritmos de optimización para reubicar las poses. Este problema se estudia a fondo en este trabajo.

La contribución de este trabajo es la creación de un método para llevar a cabo las tareas de SLAM utilizando sólo la información visual del entorno y los descriptores de apariencia global. Cada escena omnidireccional adquirida por el robot se describe utilizando estos descriptores. El método consta de tres pasos diferentes: calcular la pose del robot (posición y orientación), detectar cierres de bucle (comparando descriptores de apariencia global) y optimizar el mapa (utilizando el algoritmo de optimización G2O). El algoritmo de optimización utilizado se denomina G2O y fue presentado por Kümmerle et al. [12].

Los experimentos se han llevado a cabo con dos conjuntos diferentes de imágenes capturadas en dos entornos reales de trabajo. El primero se ha tomado siguiendo un camino rectangular en un entorno interior y el segundo ha sido capturado siguiendo un camino real incluyendo varias habitaciones en un edificio.

El resto de este trabajo se estructura de la siguiente manera. La sección 2 introduce algunos conceptos preliminares sobre la descripción de la imagen y la optimización de grafos. La sección 3 presenta el algoritmo de SLAM que hemos implementado para resolver el problema de localización y creación de mapas de manera simultánea. La sección 4 describe las bases de datos utilizadas para llevar a cabo los experimentos y presenta los resultados obtenidos. Finalmente, la sección 5 esboza las conclusiones.

2. PRELIMINARES

A lo largo de este artículo, se utilizan dos métodos para describir la apariencia global de las escenas: la transformada de Radon y HOG (Histogram of Oriented Gradients), los cuales son descritos en esta sección. Además, se presentan los fundamentos de los métodos utilizados para calcular la diferencia entre dos imágenes capturadas en diferentes posiciones. Por último, describimos el algoritmo de optimización utilizado para recalcular las posiciones de mapa después de detectar cierres de bucle.

2.1. Descriptores de Apariencia Global

Los métodos basados en la apariencia global de las escenas constituyen una alternativa robusta a los métodos basados en la extracción de características. Esto se debe a que los descriptores basados en apariencia global representan el entorno a través de características de alto nivel que se pueden interpretar y manejar fácilmente.

Esta subsección presenta los descriptores que hemos utilizado para describir las imágenes omnidireccionales. Ambos se basan en la apariencia global, sin ninguna segmentación o extracción local de características.

2.1.1. Transformada de Radon

La transformada de Radon se describió inicialmente en [13]. Existen trabajos que demuestran la eficacia de este descriptor en la descripción de formas y en la segmentación, tales como [14] y [15]. Hoang et al. [14] presentan un descriptor de forma, invariante a transformaciones geométricas, basado en las transformadas de Radon, Fourier y Mellin, y Hasegawa et al. [15] presentan un descriptor de formas que combina el histograma de la transformada de Radon y la correlación de fase. Berenguer et al. [16] presentan un método de localización 2D usando un descriptor de apariencia global basado en la transformada Radon y demuestran la eficacia y robustez de este descriptor.

Matemáticamente, la transformada de Radon de una imagen $im(i, j) \in \mathbb{R}^{K \times L}$ a lo largo de la línea $c_1(\phi, d)$ (Figura 1) puede obtenerse como:

$$\begin{aligned} \mathcal{R}\{im(i, j)\} &= \lambda_f(\phi, d) = \\ &= \int_{\mathbb{R}} im(d \cos \phi - j' \sin \phi, d \sin \phi + j' \cos \phi) dj' \quad (1) \end{aligned}$$

donde \mathcal{R} es el operador de la transformada de Radon. $im(i, j)$ es la imagen a transformar. λ_f es la imagen transformada, la cual depende de dos variables diferentes: la distancia desde la línea c_1 hasta el origen d y del ángulo entre los ejes x e i' , ϕ (Figura 1). El eje j' es paralelo a la línea c_1 .

Si consideramos diferentes valores para d y ϕ en la Ecuación (1), la función transformada $\lambda_f(\phi, d)$ se convertirá en una matriz con M filas y N columnas. M es el número de orientaciones consideradas (normalmente elegidas para cubrir toda la circunferencia), y N es el número de líneas paralelas consideradas en cada orientación (para cubrir toda la imagen). La distancia entre cada par de líneas consecutivas se considera constante.

Cuando la transformada de Radon se aplica a una imagen, se calculan las proyecciones de la imagen a lo largo de las direcciones especificadas a través de un grupo de integrales de línea a lo largo de un haz de

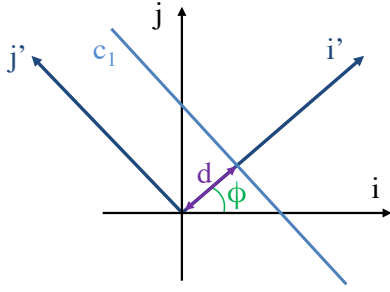


Figura 1: Parametrización de línea mediante la distancia origen d y el ángulo entre la línea normal y el eje i , ϕ .

líneas paralelas a dichas direcciones. La distancia entre cada par de líneas paralelas suele ser un píxel.

2.1.2. Histogram of Oriented Gradients (HOG)

HOG se ha utilizado tradicionalmente como un método de descripción en el campo de la detección de objetos. Fue descrito inicialmente por [17] y lo usaron en tareas de detección de personas. Sin embargo, hay varias investigaciones en las que se ha mejorado este método de descripción, como [18], donde mejoran la precisión y el coste computacional.

La implementación básica consiste en dividir la imagen en pequeñas celdas conectadas y calcular el histograma de las orientaciones del gradiente en cada celda. Entonces, el descriptor se compone de estos histogramas dispuestos en un solo vector.

Fernández et al. [19] analizan este tipo de descriptor en tareas de localización al aire libre. Además, hacen un análisis comparativo entre varios métodos para describir imágenes panorámicas.

2.2. Phase Only Correlation (POC)

En esta subsección se presenta el método utilizado para comparar la transformada de Radon de dos imágenes, el cual proporciona una medida de la diferencia entre la apariencia visual de dos ubicaciones y la estimación del cambio de orientación del robot entre estas ubicaciones.

POC (Phase Only Correlation), propuesto en [20], es una operación realizada en el dominio de la frecuencia que proporciona un coeficiente de correlación entre dos imágenes [21]. En nuestro caso, comparamos dos transformadas de Radon, pero esto no afecta al funcionamiento de POC porque la transformada de Radon se puede interpretar como una imagen. En general, permite obtener tanto la orientación relativa entre dos diferentes transformadas de Radon como un coeficiente de similitud entre ellas, como se muestra en [16].

La correspondencia entre dos imágenes $im_1(i, j)$ e $im_2(i, j)$ calculadas por POC viene dada por la siguiente ecuación:

$$C(i, j) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{\mathbf{IM}_1(u, v) \cdot \mathbf{IM}_2^*(u, v)}{|\mathbf{IM}_1(u, v) \cdot \mathbf{IM}_2^*(u, v)|} \right\} \quad (2)$$

Donde \mathbf{IM}_1 es la transformada de Fourier de la imagen 1 y \mathbf{IM}_2^* es el conjugado de la transformada de Fourier de la imagen 2. \mathcal{F}^{-1} es el operador inverso de la transformada de Fourier.

Para estimar la distancia entre las dos imágenes (im_1 e im_2) hemos utilizado la siguiente expresión:

$$dist(im_1, im_2) = 1 - \max\{C(i, j)\} \quad (3)$$

$\max\{C(i, j)\}$ es un coeficiente que toma valores en el intervalo $[0, 1]$ y mide la similitud entre las dos imágenes im_1 e im_2 .

Esta operación es invariante frente a desplazamientos de las imágenes a lo largo de los ejes i y j . Además, es posible estimar estos desplazamientos Δ_x y Δ_y a lo largo de ambos ejes mediante:

$$(\Delta_x, \Delta_y) = \operatorname{argmax}_{(i, j)} \{C(i, j)\} \quad (4)$$

Si comparamos las transformadas de Radon de dos imágenes omnidireccionales usando POC, el valor Δ_x es proporcional a la orientación relativa α del robot al capturar las imágenes, de acuerdo con la Ecuación (5). La Figura 2 muestra las transformaciones de Radon de dos imágenes omnidireccionales diferentes capturadas desde el mismo punto (x_w, y_w, z_w) pero con orientaciones del robot diferentes con respecto al eje z_w , θ (Figura 2).

$$\alpha = \frac{\Delta_x \cdot 2\pi}{N} \quad (5)$$

De esta manera, POC es capaz de comparar dos imágenes independientemente en la orientación y también es capaz de estimar este cambio de orientación.

2.3. Algoritmo de optimización: G2O

G2O es un algoritmo de optimización descrito en [12]. Este método fue creado para optimizar funciones de errores no lineales basadas en grafos.

En el campo del SLAM, el robot tiene que calcular su pose cuando toma cada nueva imagen con respecto a las poses anteriores almacenadas en el mapa. Esta operación tiene un error asociado que va incrementando con cada nuevo cálculo de pose, por lo que necesitamos corregir las poses almacenadas en el mapa para disminuir esta desviación. G2O puede volver a calcular cada pose del mapa usando nuevas restricciones.

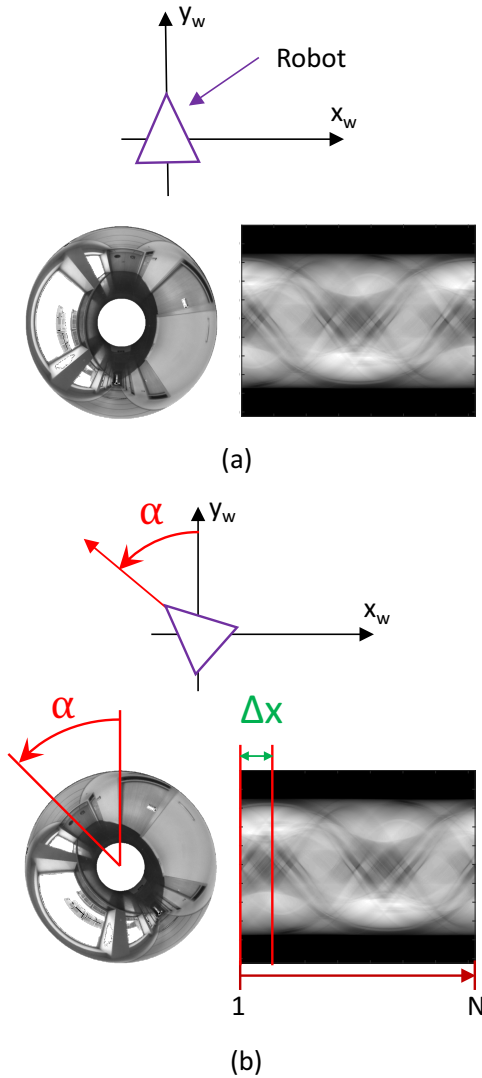


Figura 2: (a) Imagen omnidireccional capturada desde una posición específica de un entorno virtual y su transformada Radon. (b) Imagen omnidireccional tomada desde el mismo lugar cambiando solamente la orientación del robot alrededor del eje z_w , y su transformada Radon. Un cambio en la orientación del robot alrededor del eje z_w produce un desplazamiento en las columnas de la transformada Radon, Δx .

Una de estas restricciones se puede obtener cuando se producen cierres de bucle entre una pose del mapa existente y la nueva pose del robot. Entonces, G2O reubica cada nodo del mapa modificándolos gradualmente para cumplir con la restricción de cierre de bucle. Entonces, el nuevo nodo se ubica en la misma posición que la pose equivalente almacenada en el mapa.

3. ALGORITMO DE SLAM

En esta sección, presentamos nuestro algoritmo de SLAM visual. El robot pasa por el entorno y captu-

ra imágenes de algunas posiciones. Cada vez que llega una nueva imagen, el robot incluye un nuevo nodo dentro del mapa, el cual está formado por nodos. A continuación, se resuelve el problema SLAM siguiendo estos tres pasos:

Primero, el robot calcula dos descriptores de la imagen: la transformada de Radon y el descriptor HOG y los almacena en el nodo. Entonces, el robot crea un nuevo nodo y lo ubica dentro del mapa calculando la posición y orientación del nuevo nodo con respecto al nodo previamente agregado y se crea un enlace entre ambos nodos. Este proceso de localización se realiza utilizando sólo información visual.

En segundo lugar, el robot comprueba la existencia de posibles cierres de bucle comparando la nueva escena con las escenas anteriores almacenadas en el mapa.

Finalmente, el mapa se optimiza utilizando el algoritmo G2O con los cierres de bucle detectados. Este proceso se repite en cada nueva ubicación.

3.1. Creación del mapa

Esta subsección presenta el método propuesto para calcular las coordenadas de las poses de los nuevos nodos. Estas poses se calculan obteniendo la distancia y el ángulo entre las escenas. Para cada nuevo nodo, el robot almacena el descriptor de Radon y el descriptor HOG de la nueva imagen omnidireccional para hacer posible su localización.

La Figura 3 muestra un esquema del proceso de creación de mapas. Consiste en el cálculo de las coordenadas (x_k, y_k) de cada nuevo nodo. Estas coordenadas se calculan a partir de la distancia y el ángulo respecto a la posición anterior.

La distancia entre ubicaciones se calcula usando la Ecuación 3. Es una distancia imagen y no es una distancia métrica, es decir, esta distancia no es una unidad de medida real, sino que es proporcional a la distancia métrica.

β_k , es aproximadamente el ángulo de orientación, α_k , calculado usando la Ecuación 5:

$$\beta_k \approx \alpha_k \quad (6)$$

Cuanto más cerca están las poses, más exacta es la aproximación, ya que el cambio de orientación del robot es menor, y el error cometido en la aproximación se reduce. Sin embargo, cabe tener en cuenta que se trata de estimaciones cuyo error se reducirá durante el posterior proceso de optimización cuando se detecte un cierre de ciclo.

Finalmente, las coordenadas de cada nodo (x_k, y_k) se calculan mediante estas ecuaciones:

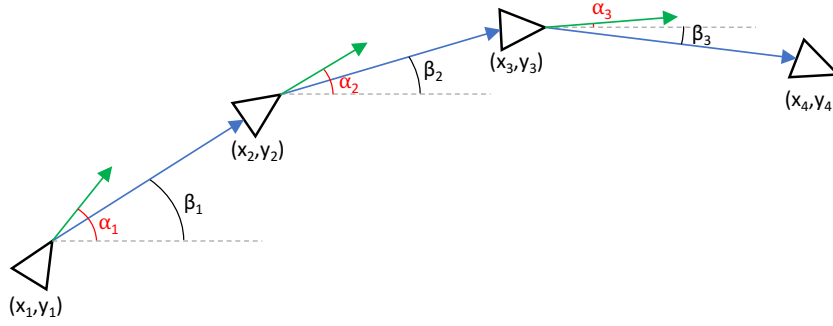


Figura 3: Esquema del proceso de creación de mapas.

$$x_k = \text{dist}(im_{k-1}, im_k) \cdot \cos(\alpha_k) \quad (7)$$

$$y_k = \text{dist}(im_{k-1}, im_k) \cdot \sin(\alpha_k) \quad (8)$$

donde $\text{dist}(im_{k-1}, im_k)$ es la distancia POC entre dos imágenes consecutivas calculadas usando la Ecuación 3, y α_k es el ángulo de orientación del nodo k , calculado usando la Ecuación 5.

3.2. Cierres de Bucle

El siguiente paso del algoritmo consiste en detectar cierres de bucle. Para ellos, se compara el descriptor HOG de la nueva imagen tomada por el robot con los descriptores HOG almacenados en el mapa. Para calcular la distancia entre los descriptores HOG se utiliza la similitud de coseno entre ellos para calcular la distancia:

$$\text{dist}(\vec{d}_1, \vec{d}_2) = 1 - \frac{\vec{d}_1 \cdot \vec{d}_2^T}{\sqrt{(\vec{d}_1 \cdot \vec{d}_1^T)(\vec{d}_2 \cdot \vec{d}_2^T)}} \quad (9)$$

donde \vec{d}_1 y \vec{d}_2 son los descriptores HOG de dos imágenes diferentes.

Los cierres de bucle deben determinarse definiendo un umbral máximo de distancia, W (Ecuación 10). Este umbral se define como una constante en el inicio del proceso de SLAM. Si la distancia es inferior a este umbral, las dos poses comparadas se considerarán como la misma posición (x, y) , pero la orientación del robot puede ser diferente.

$$\text{if}(\text{dist}(\vec{d}_1, \vec{d}_2) < W) \rightarrow \text{cierre de bucle} \quad (10)$$

3.3. Optimización del mapa

Teniendo en cuenta los cierres de bucle detectados, el robot utiliza esta información para optimizar el mapa almacenado. Esta optimización se realiza utilizando el algoritmo de optimización G2O.

Cuando el robot detecta un cierre de bucle, tiene que reubicar todos los nodos anteriores para reducir el error asociado en cada posición. Este proceso modifica todas las posiciones de los nodos en el mapa para tener en cuenta la nueva restricción calculada por la detección de cierre de bucle.

La modificación de la ubicación de los nodos se realiza mediante el algoritmo G2O. Dicho algoritmo recibe como entrada todas las posiciones de los nodos del mapa y la restricción de cierre de bucle. Entonces, G2O da como salida las nuevas posiciones de los nodos recalculadas.

Por lo tanto, los dos nodos del cierre del bucle se localizan en la misma posición y se modifican las coordenadas del resto de los nodos del mapa.

4. EXPERIMENTOS

Esta subsección presenta los diferentes conjuntos de imágenes omnidireccionales utilizados para probar nuestro método y los resultados obtenidos en estos experimentos.

4.1. Bases de datos

Para comprobar el funcionamiento de la técnica propuesta, se utilizan dos conjuntos de imágenes capturadas por nosotros mismos. Para capturar el primer conjunto, el robot fue teleoperado para seguir un camino rectangular. El segundo conjunto de imágenes fue capturado mientras el robot seguía un camino más complicado a través de varias habitaciones dentro de un edificio. Figura 4 muestra una imagen omnidireccional de muestra de cada entorno.

Estas dos bases de datos se han creado tomando una imagen omnidireccional cada 40 cm aproximadamente. La Figura 5 muestra el sistema catadióptrico utilizado para capturar las imágenes omnidireccionales, formado por la cámara (modelo: DFK-41BF02) y el espejo hiperbólico (modelo: Eizo Wide70).

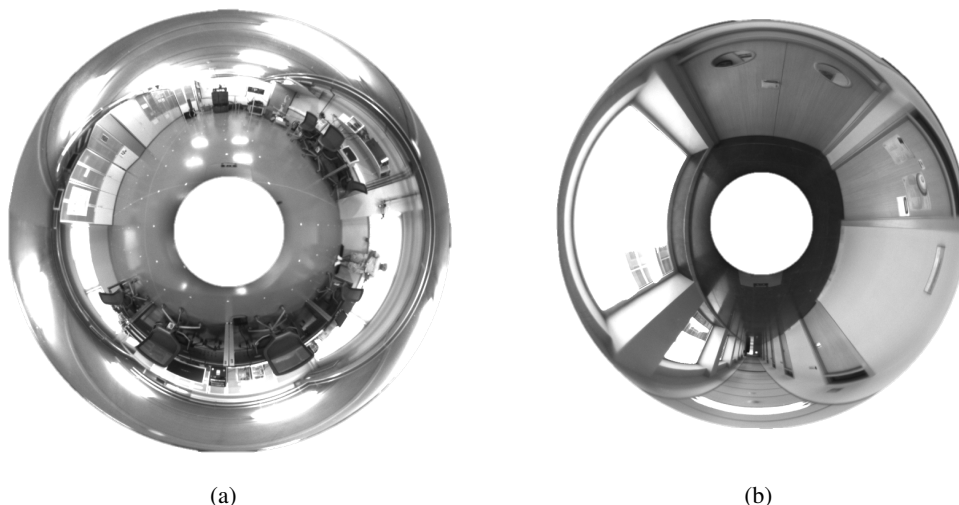


Figura 4: (a) Muestra de una imagen omnidireccional de la trayectoria rectangular.(b) Imagen de muestra del segundo recorrido.



Figura 5: Sistema de adquisición de imágenes omnidireccionales.

4.2. Resultados

En esta sección se muestran los resultados de los experimentos realizados con nuestro algoritmo SLAM. Las dos bases de datos descritas en la sección 4.1 se han utilizado para llevar a cabo estos experimentos.

El umbral máximo de distancia entre descriptores HOG es un parámetro importante a sintonizar. Para ello, hemos hecho algunas pruebas y elegido el mejor valor para detectar cierres de bucles. Después de estas pruebas se considera un umbral igual a 0,006 como un buen valor de la distancia entre descriptores HOG.

La Figura 6 muestra los resultados del algoritmo SLAM después de incorporar la posición final de la

primera ruta. La línea azul es el mapa creado sin optimización y la línea verde es el mismo mapa optimizado. Esta optimización se realiza en cada iteración pero el mapa sin ninguna optimización se muestra a efectos comparativos. Como podemos ver, la línea verde es un camino cuadrado.

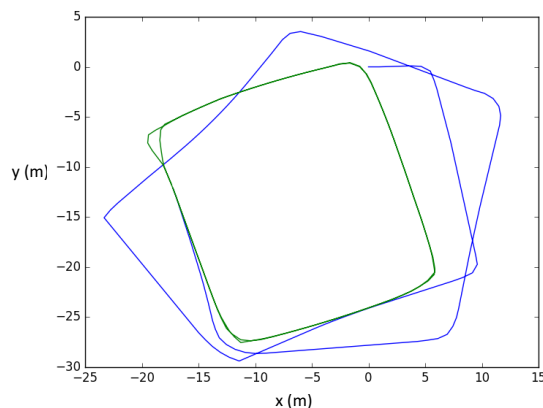


Figura 6: Mapa creado utilizando el primer recorrido. La línea azul es el mapa creado sin optimización y la línea verde es el mismo mapa optimizado.

La Figura 7 muestra los mismos resultados que en la Figura 6 pero utilizando la segunda ruta. La línea azul es el mapa creado sin optimización, la línea verde es el mismo mapa optimizado y la línea amarilla es la trayectoria real.

En cuanto al tiempo computacional, el robot pasa un promedio de 0,65 segundos en cada iteración del proceso SLAM. Este tiempo aumenta en cada iteración porque el mapa está formado por mayor cantidad de nodos y la detección de cierre de bucle necesita comparar un mayor número de descriptores HOG.

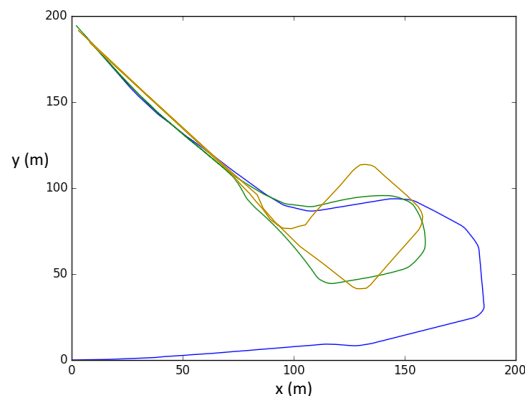


Figura 7: Mapa creado utilizando el segundo recorrido. La línea azul es el mapa creado sin optimización, la línea verde es el mismo mapa optimizado y la línea amarilla es la trayectoria real.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos presentado un método SLAM para estimar la posición y la orientación de un robot móvil en un entorno a la vez que el robot crea el mapa. Utilizamos dos descriptores de apariencia global diferentes para llevar a cabo el proceso SLAM y el mapa está formado por estos dos descriptores de cada imagen. Por último, el algoritmo ha sido probado con dos conjuntos de imágenes capturadas en dos entornos interiores diferentes.

Los resultados han demostrado la exactitud del método. En cuanto a los valores de los parámetros, el umbral máximo de distancia entre descriptores HOG es el parámetro de ajuste principal en este método.

Los resultados presentados en este trabajo muestran la efectividad de los descriptores de apariencia global de imágenes omnidireccionales para llevar a cabo tareas de SLAM gracias a la riqueza de la información que contienen. Ahora estamos trabajando para mejorar este método y estamos tratando de estimar con mayor precisión la orientación relativa entre los nodos. Además, estamos implementando un método de agrupación para reducir el tiempo computacional para detectar cierres de bucle cuando se aumenta el número de nodos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado por el gobierno español a través del proyecto DPI2016-78361-R (AEI/FEDER, UE) “Creación de Mapas Mediante Métodos de Apariencia Visual para la Navegación de Robots”.

Referencias

- [1] R. Munguia, S. Urzua, and A. Grau, “Delayed monocular slam approach applied to unmanned aerial vehicles,” *PLOS ONE*, vol. 11, no. 12, pp. 1–24, 12 2016.
- [2] T. Whelan, R. F. Salas-Moreno, B. Glocker, A. J. Davison, and S. Leutenegger, “Elasticfusion: Real-time dense slam and light source estimation,” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 35, no. 14, pp. 1697–1716, 2016.
- [3] H. Nagahara, K. Yoshida, and M. Yachida, “An omnidirectional vision sensor with single view and constant resolution,” in *2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision*, Oct 2007, pp. 1–8.
- [4] D. Valiente, A. Gil, L. Fernández, and O. Reinoso, “A comparison of ekf and sgd applied to a view-based slam approach with omnidirectional images,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 62, no. 2, pp. 108 – 119, 2014.
- [5] E. Garcia-Fidalgo and A. Ortiz, “Vision-based topological mapping and localization methods: A survey,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 64, pp. 1 – 20, 2015.
- [6] D. Lowe, “Object recognition from local scale-invariant features,” in *ICCV 1999, International Conference on Computer Vision*, vol. 2, 1999, pp. 1150–1157.
- [7] H. Bay, T. Tuytelaars, and L. Gool, “Surf: Speeded up robust features,” *Computer Vision at ECCV*, vol. 3951, pp. 404–417, 2006.
- [8] C. Chang, C. Siagian, and L. Itti, “Mobile robot vision navigation and localization using gist and saliency,” in *IROS 2010, International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2010, pp. 4147–4154.
- [9] L. Payá, L. Fernández, L. Gil, and O. Reinoso, “Map building and monte carlo localization using global appearance of omnidirectional images,” *Sensors*, vol. 10, no. 12, pp. 11 468–11 497, 2010.
- [10] J. Wu, H. Zhang, and Y. Guan, “An efficient visual loop closure detection method in a map of 20 million key locations,” in *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2014, pp. 861–866.
- [11] L. Payá, F. Amorós, L. Fernández, and O. Reinoso, “Performance of global-appearance descriptors in map building and localization using omnidirectional vision,” *Sensors*, vol. 14, no. 2, pp. 3033–3064, 2014.
- [12] R. Kümmerle, G. Grisetti, H. Strasdat, K. Konolige, and W. Burgard, “G2o: A general framework for graph optimization,” in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 2011, pp. 3607–3613.
- [13] J. Radon, “Über die bestimmung von funktionen durch ihre integralwerte langs gewisser mannigfaltigkeiten,” *Berichte Sachsische Akademie der Wissenschaften*, vol. 69, no. 1, pp. 262–277, 1917.
- [14] T. Hoang and S. Tabbone, “A geometric invariant shape descriptor based on the radon, fourier, and mellin transforms,” in *20th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, Aug 2010, pp. 2085–2088.

- [15] M. Hasegawa and S. Tabbone, "A shape descriptor combining logarithmic-scale histogram of radon transform and phase-only correlation function," in *2011 International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*, Sept 2011, pp. 182–186.
- [16] Y. Berenguer, L. Payá, M. Ballesta, and O. Reinoso, "Position estimation and local mapping using omnidirectional images and global appearance descriptors," *Sensors*, vol. 15, no. 10, p. 26368, 2015.
- [17] N. Dalal and B. Triggs, "Histograms of oriented gradients for human detection," in *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, vol. 1, June 2005, pp. 886–893 vol. 1.
- [18] Q. Zhu, M.-C. Yeh, K.-T. Cheng, and S. Avidan, "Fast human detection using a cascade of histograms of oriented gradients," in *2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06)*, vol. 2, 2006, pp. 1491–1498.
- [19] L. Fernández, L. Payá, O. Reinoso, L. Jiménez, and M. Ballesta, "A study of visual descriptors for outdoor navigation using google street view images," *Journal of Sensors*, vol. 2016, 2016.
- [20] C. Kuglin and D. Hines, "The phase correlation image alignment method," in *In Proceedings of the IEEE, International Conference on Cybernetics and Society*, 1975, pp. 163–165.
- [21] K. Kobayashi, T. Aoki, K. Ito, H. Nakajima, and T. Higuchi, "A fingerprint matching algorithm using phase-only correlation," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, pp. 682–691, 2004.

Medición de Oximetría de Pulso mediante Imagen fotopleletismográfica.

Juan-Carlos Cobos-Torres

Universidad Carlos III de Madrid-Leganés, jcobos@ing.uc3m.es

Jordan Ortega Rodríguez

Universidad Carlos III de Madrid-Leganés, joortega@ing.uc3m.es

Pablo J. Alhama Blanco

Universidad Carlos III de Madrid-Leganés, palhama@pa.uc3m.es

Mohamed Abderrahim

Universidad Carlos III de Madrid-Leganés, mohamed@ing.uc3m.es

Resumen

El presente método permite realizar la medición de la oximetría de pulso sin contacto por la técnica de imagen fotopleletismográfica (FPGI). El filtro de Kalman se usa para reducir las frecuencias bajas de las señales FPGI. El método tiene características que lo convierten en una innovación en el campo. El paciente no tiene ningún contacto con el dispositivo de medición, y el algoritmo desarrollado tiene un requerimiento computacional bajo. Además, el método tiene una alta tolerancia a los artefactos. El enfoque analiza señales pletismográficas recogidas a través de una cámara de color estándar para estimar la oximetría de pulso. Los promedios de cada trama par e impar crean dos señales. Cada trama está sincronizada con una iluminación multiplexada de longitud de onda específica 640 y 950 nm respectivamente. El presente estudio ha obtenido una buena estimación de la oximetría de pulso para diez sujetos. El análisis de Bland-Altman muestra una fuerte correlación entre un sistema estándar y la medición FPGI.

Palabras Clave: Imagen Fotopleletismográfica, Filtro de Kalman, Frecuencia Cardíaca, Saturación de oxígeno, Medición en línea.

1 INTRODUCCIÓN

El oxímetro de pulso consta de dos diodos emisores (el primero, emite luz roja a aproximadamente 650 nm; el segundo, emite luz infrarroja a aproximadamente 920 nm) y un detector de fotodiodos [1], [2]. Una carcasa de plástico cubre los diodos, el fotodiodo y el miembro de la persona para evitar la interferencia de fuentes de luz distintas a la luz del dispositivo. Esta carcasa también permite la sujeción y el posicionamiento correcto del oxímetro. Debido a su facilidad de uso y colocación, la

oximetría de pulso puede utilizarse fuera del contexto clínico (durante la anestesia [3], el cuidado crítico [4], el triaje [5], etc.). Por esta razón, son varios los métodos que han propuesto el uso de cámaras para medir la saturación de oxígeno (SPO₂). En primer lugar, los dispositivos que forman parte de nuestra vida cotidiana, tales como teléfonos móviles, tabletas y computadoras se pueden usar o emplear como dispositivos de medición. Además, estos dispositivos permiten la adquisición de vídeo en línea y cada trama puede procesarse, lo cual nos permite buscar y detectar cambios de color producidos por el flujo sanguíneo en los capilares de la piel.

Wieringa et al. [6], detallan la adquisición de latidos cardíacos a través de una cámara especial (frecuencia de muestreo de 100 Hz) con un sensor CMOS monocromático y tres longitudes de onda diferentes (diodos LEDs que emiten luz a 660, 810 y 940 nm). El estudio muestra la posible medición de la SPO₂ sin contacto a través de la reflexión de la luz. No se debe olvidar, una cámara monocromática es más sensible que una cámara RGB por no contar con un filtro para cada color. Además, mediante la lente apocromática se concentran las tres longitudes de onda presentes en la iluminación utilizada en el foco del plano del sensor de la cámara; por lo cual los latidos del corazón se encuentran presentes con las tres longitudes de onda.

Kong et al. [7], presentan otra metodología distinta que utiliza dos cámaras monocromáticas bajo iluminación regular para medir la SPO₂ de la sangre (cada cámara tiene un filtro de banda estrecha de 660 nm y 520 nm). El método utiliza dos longitudes de onda concretas que no siempre están presentes dentro del espectro de cada tipo de iluminación disponible, como ocurre por ejemplo en el caso de emplear LED blanco o luz fluorescente. Por lo tanto, el método sólo funcionará correctamente en entornos con luz natural.

Otros métodos [8], [9] usan cámaras normales con sensores CMOS o CCD. Cada uno tiene diferentes configuraciones para la adquisición: respectivamente, frecuencia 12 y 20 fps, resolución 5 y 2 megapíxeles, y distancia 100, 40 cm. Los métodos, calculan la SPO_2 bajo una iluminación regular. Además, los muestran que la SPO_2 se puede calcular a través de los canales rojo y azul de la cámara RGB; lo que cambia es la herramienta utilizada para la extracción de la señal fotopletismográfica. El primer método utiliza un proceso autorregresivo, es esencialmente un filtro de respuesta de impulso infinito (IIR). No es aconsejable diseñar directamente un filtro de paso bajo IIR que tenga una frecuencia de muestreo de banda de paso muy pequeña, ya que los polos deben estar agrupados muy cerca; entonces, un movimiento ligero de los polos dañará la respuesta de frecuencia deseada. El segundo método, (desarrollado por los mismos autores principales) utiliza el proceso ICA con un conjunto de modelos autorregresivos. Su principal inconveniente es un coste computacional elevado.

Sin embargo, los métodos anteriores sufren una limitación significativa que consiste en que sólo funcionan en entornos con iluminación natural o una iluminación excelente. Además, los métodos sólo funcionan en implementaciones fuera de línea porque sus algoritmos tienen un coste computacional elevado. Por otra parte, sólo el método presentado por Bal [10], utiliza un sistema automático para detectar la región de interés (ROI). La detección sufre un efecto de sacudida o agitación, ya que en la detección realizada por el método de Haar Cascade se observa este efecto claramente en el cuadro delimitador de la ROI. Este problema podría causar artefactos o ruidos en la señal pletismográfica adquirida.

Por último, el método denominado Sofía [11], es interesante, ya que utiliza una metodología diferente. Utiliza promedios de múltiples ROIs; pero los autores, no explican el método de filtrado para las señales pletismográficas, ni especifican el uso de un filtro de eliminación de tendencia. Al parecer, se utiliza un filtro no causal de paso de banda que los autores explican en otro documento [12].

El presente método sin contacto propuesto, demuestra que es factible medir la SPO_2 a través de una cámara de color estándar con un sistema elemental de iluminación. El sistema tiene su propia iluminación y por tanto funciona independientemente de la iluminación ambiental. Además, al utilizar un filtro kalman para el offset o la tendencia de la señal permite su uso para la medida de la frecuencia cardíaca y SPO_2 de manera robusta y con un coste computacional bajo; características fundamentales que le permiten trabajar en línea.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Mediante una cámara a color estándar se captura la señal pletismográfica para estimar el pulso cardíaco y la SPO_2 en la piel de un sujeto. El ROI seleccionado, es una pequeña región en la frente de una persona. Dos matrices de diodos emisores de luz se utilizan para iluminar el ROI (640 y 950 nm); las cuales se denominarán Fuente de Luz Multiplexada (MLF). Los frames de la cámara se sincronizan con cada matriz de iluminación. Los componentes principales del sistema se representan en la Fig. 1. Por último, utilizamos un oxímetro de pulso médico para verificar la medición de la oximetría de pulso.

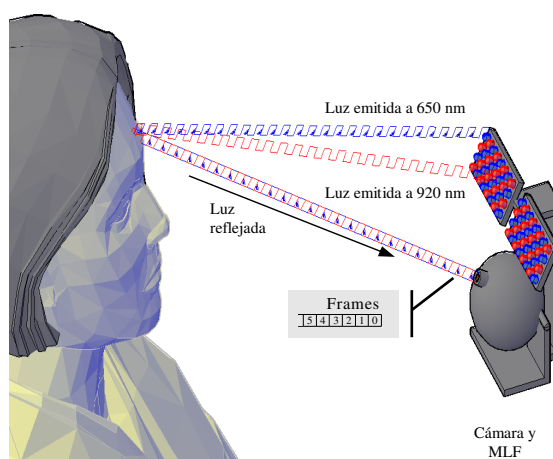


Figura 1: Configuración del experimento. Frames pares luz reflejada a 640 nm y frames impares luz reflejada a 950 nm.

2.1 HARDWARE

La cámara utilizada es una cámara Web con sensor OV9710 HD CMOS, con un tamaño de sensor de 1/4"; proporciona una resolución WXGA (1280 x 800), con una frecuencia de captura máxima de 30 frames por segundo.

La MLF diseñada y construida utilizando 24 LEDs, formando una matriz intercalada. El primer grupo tiene 12 LEDs rojos con una longitud de onda pico de 640 nm aproximadamente y el segundo grupo tiene 12 LED IR con una longitud de onda pico de 950 nm aproximadamente (ambos tipos de LED tienen un tamaño T-1 3/4). La disposición de los LEDs rojo e IR se representa en la Fig. 1.

2.2 POBLACIÓN

La investigación se realizó de acuerdo con las regulaciones, principios y aprobaciones necesarias. En este experimento, participaron voluntariamente diez sujetos de edad y sexo diferente; para estructurar una muestra heterogénea, permitiendo demostrar la

eficiencia del método propuesto. Durante las mediciones los sujetos estaban sentados frente a la cámara y a la MLF, ubicados a una distancia aproximadamente de 50 cm.

2.3 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

La luz reflejada detectada en la superficie de la piel ha viajado a través de las capas de la piel. El proceso se ilustra en la Fig. 2. Si se aplica una luz incidente a la piel, parte de esta luz es absorbida. La onda larga UV, el espectro visible y el infrarrojo cercano se dispersan hacia adelante a la dermis (la profundidad de absorción de la radiación está determinada por la longitud de onda); fibras de colágeno muy densas, agua y vasos sanguíneos componen la dermis [13]. Las fibras de colágeno dispersan la luz fuertemente. La capa de la epidermis produce retro-dispersión de una parte de la luz. La luz retro-dispersada ha pasado a través de los vasos sanguíneos, por lo que oxihemoglobina (HbO_2) y des-oxihemoglobina (Hb) han absorbido algunas longitudes de onda de luz y la luz retro-dispersada ha sido modulada por el flujo sanguíneo pulsante, para seguir siendo dispersada hacia adelante al estrato córneo. La luz resultante se transmite y viaja a la cámara con la señal pletismográfica. Además, es importante recordar que la intensidad de la luz reflejada es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre el MLF y la piel, así como entre la piel y la cámara.

La estructura general, utilizada para la obtención de la frecuencia cardíaca es detallada en la Fig. 2.

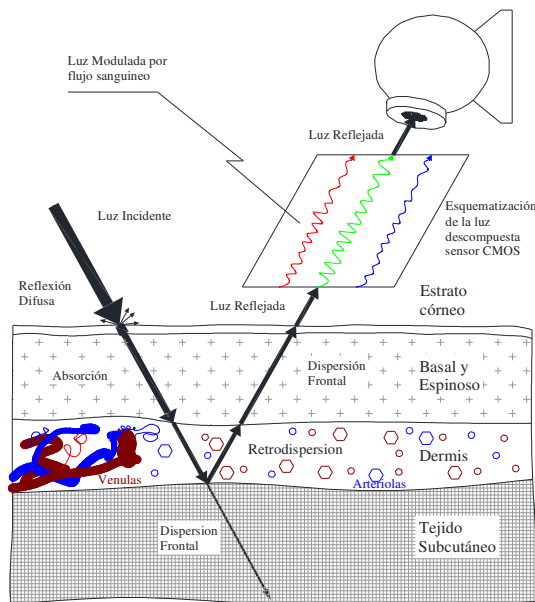


Figura 2: Interacción de la piel con una luz incidente.

La cámara captura la luz de la superficie de la piel y las imágenes se procesan en línea. El lenguaje de

programación Python fue seleccionado para procesar las imágenes, junto con varias librerías. La librería OpenCV se utiliza para comunicarse con la cámara. Además, la librería Kazemi y Sullivan [14] permite la detección facial. Este detector utiliza un conjunto de árboles de regresión para la selección de la cara. Las características utilizadas son las cejas (principio y final). Con esta información, procedemos a estimar el área de análisis, corresponde a un área promedio de 1600 píxeles cuadrados (40 x 40 píxeles); cuando el sujeto se encuentra a una distancia estimada de 50 cm de la cámara. Dado que no todos los píxeles en el ROI seleccionado contienen la variación de brillo de la señal pletismográfica, los píxeles se combinan en un valor de brillo medio único. Los frames de la cámara se sincronizan con cada matriz de iluminación. Cada matriz ilumina diferentes frames capturados por la cámara (par e impar). Después de calcular el promedio de ROI, se generan las pilas tipo FIFO (primero en entrar, primero en salir). De este modo, se obtienen dos señales pletismográficas a través del mismo canal del sensor de la cámara (canal rojo); este es el principal requisito para estimar la SPO_2 .

2.3 CALIBRACIÓN DE LA FUENTE DE LUZ MULTIPLEXADA

Se prestó la debida atención a la seguridad de los ojos y la piel. La potencia radiada de los LEDs y/o IR-LEDs y/o el tiempo de exposición pueden afectar la piel o los ojos de diferentes maneras. Un tiempo largo de exposición o una alta radiación podrían causar una destrucción celular por sobrecalentamiento del tejido irradiado; dando como resultado un daño permanente al tejido. Bajo estos parámetros de seguridad se diseñó y construyó el MLF, bajo la norma IEC-62471.

El MLF se compone de la matriz de 12 x IR LEDs y 12 x LEDs rojos. La primera matriz tiene una operación pulsada de impulso $IF = 100$ mA (corriente directa), longitud de onda pico 950 nm. La segunda serie tiene una operación pulsada de $IF = 10$ mA, longitud de onda pico 640 nm. Ambas matrices tienen tiempo de pulso $tp = 16,5$ ms, ciclo de servicio $D = 0,5$ para fines de irradiación, distancia mínima para el usuario $r > 0,5$ m para iluminación de cara, tamaño de matriz de $0,3 \times 0,3$ mm², tiempo de exposición $t > 1000$ s.

2.4 ALGORITMO DE PROCESAMIENTO

El esquema general adoptado para el procesamiento de las imágenes, estimación de la frecuencia cardíaca y la SPO_2 se ilustra en la Fig. 3. Las mediciones son adquiridas en línea. Como primer paso, la cámara y MLF se sincronizan. Un microcontrolador Arduino

hace parpadear la matriz de LEDs y se comunica a través de una interfaz serie, usando el código Python.

A continuación, las marcas faciales se encuentran desde el primer frame. La posición de la cabeza (tono, guiñada y alabeo) se calcula con las marcas de las cejas (comienzo y final). El principio y el final de las cejas definen el ROI en forma de rectángulo. La forma ROI se selecciona en una posición paralela a la línea imaginaria que conecta las cejas (caso de alabeo). El tamaño de la ROI depende de la distancia entre las cejas (además, también depende de la distancia de la cara a la cámara). Asimismo, el rectángulo crece horizontalmente en la dirección opuesta a la del movimiento de la cara (guiñada) y en ambas direcciones (tono). Una vez que se define la ROI, sus píxeles se combinan en un sólo valor promedio. Con cada nuevo promedio de cada trama, generamos dos pilas FIFO. Los frames pares generan la primera pila (trama iluminada a 640 nm) y los frames impares generan la segunda pila (trama iluminada a 950 nm).

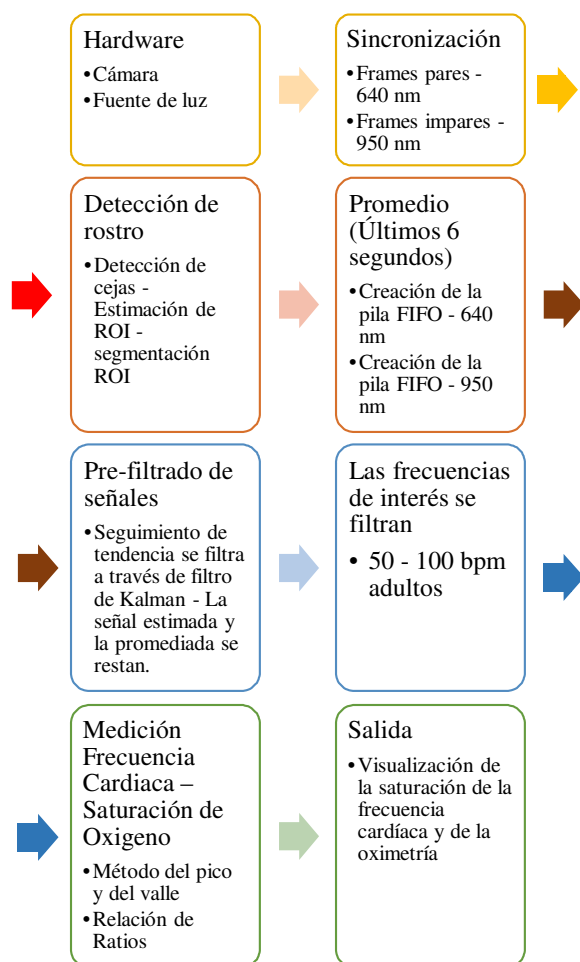


Figura 3: Secuencia utilizada para las mediciones

La dimensión de la pila es de 6 segundos. Este valor se selecciona porque es lo suficientemente largo

como para tener un mínimo de seis pulsos cardíacos. Después de llenar las pilas, el método de Kalman estima el desplazamiento de las señales (seguimiento de tendencia). Se genera un filtro de frecuencia baja cuando se restan las señales promedio y de estimación. Este filtro es muy estable y sensible a los cambios en la señal. Además, tiene un tiempo de estabilización inicial muy rápido con un coste computacional bajo.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se compararon los valores de las medidas, obtenidas mediante un oxímetro de pulso de dedo convencional y el método de medición sin contacto propuesto. Los sujetos respiraban espontáneamente cuando los valores fueron medidos. El grado de acuerdo para las mediciones se calcula usando las mediciones tomadas de diez sujetos, como se muestra en la Fig. 4. La figura muestra que los resultados con el dispositivo sin contacto son comparables con los del dispositivo de contacto como monitor de pulsimetría Fig. 4a y SPO₂. Fig. 4b.

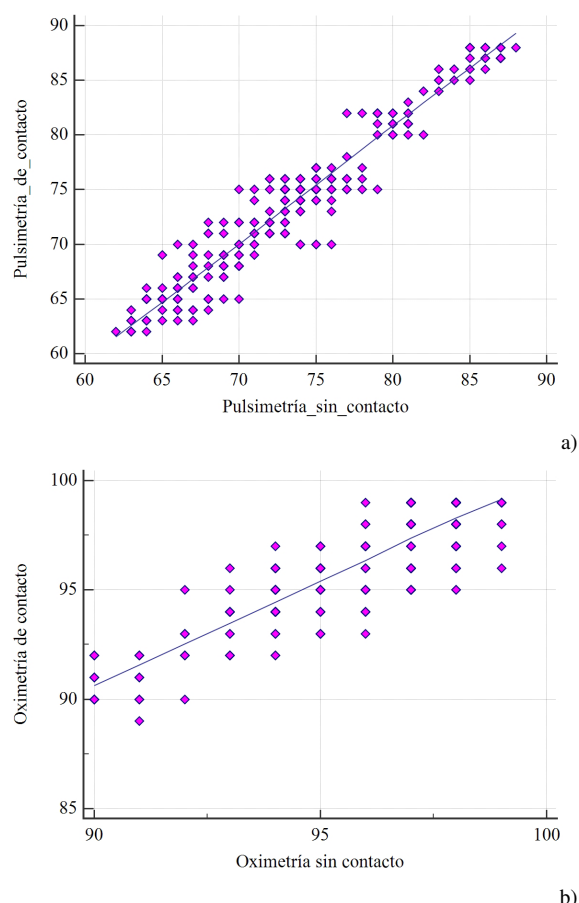


Figura 4: Diagrama de dispersión que muestra la relación entre las medidas realizadas con el método de contacto y el método propuesto sin contacto (a) Pulso cardíaco, (b) SPO₂.

Además, se analizaron los resultados mediante el método de Bland-Altman [15] con el fin de confirmar el rendimiento y la fiabilidad del sistema. Las diferencias entre las medidas por contacto y sin contacto se representan en función de los promedios de ambos sistemas para la pulsimetría y la oximetría, Fig. 5. Los promedios están representados por líneas de puntos; 95% de los límites de acuerdo ($\pm 1,96$ SD) se representan por líneas de trazos. Específicamente, el sesgo medio fue de 0,3 con límites de acuerdo del 95%, -3,3 a 3,9 bpm para el pulso cardíaco. Y para la SPO₂, el sesgo medio fue de 0,3 con límites de acuerdo del 95%, -2,1 a 2,7%. La desviación estándar de los residuos es de 1,83 para el pulso cardíaco y de 1,23 para el SPO₂.

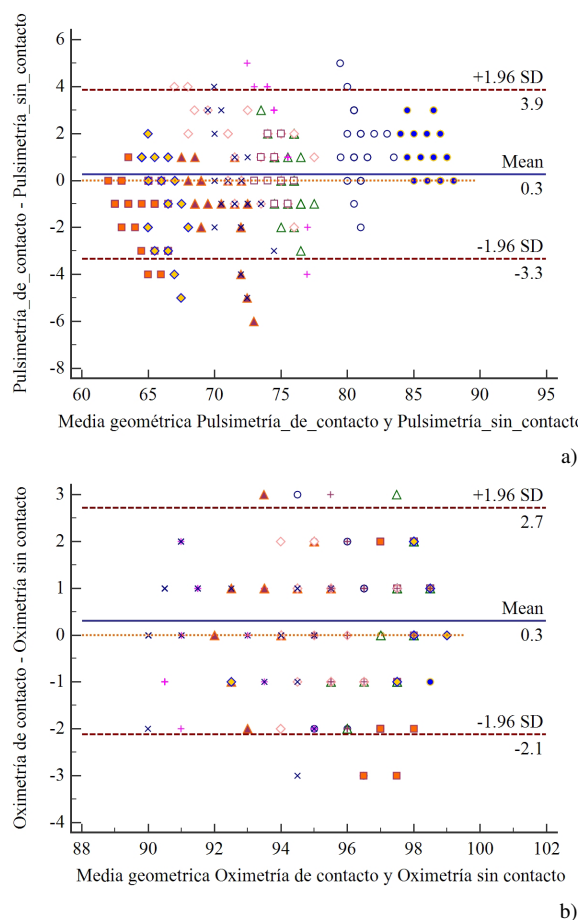


Figura 5: Gráficos de Bland-Altman que muestra el nivel de acuerdo entre las medidas realizadas con el método de contacto y el método propuesto sin contacto. (a) Pulso cardíaco, (b) SPO₂.

La medida remota de la pulsimetría y oximetría a través de una cámara de color estándar y MLF fue investigada en este trabajo. Hemos diseñado, implementado y evaluado un método para obtener la frecuencia cardíaca así como la SPO₂. El método funciona a partir de imágenes capturadas de la cara de un sujeto, adquiridas y procesadas en línea.

Finalmente, se evalúa el rendimiento del sistema; los resultados muestran un buen acuerdo entre las medidas realizadas por el método propuesto y las medidas obtenidas mediante un sensor de oxímetro de pulso comercial. El MLF utilizado, permite que el dispositivo esté libre de cualquier interferencia producida por la luz ambiente. Además, la mayoría de los métodos existentes tienen un costo computacional muy alto, y los pocos que están diseñados para trabajar en línea, también son muy susceptibles a artefactos (variación de iluminación y/o movimiento de personas). Todas estas deficiencias han sido ampliamente superadas en el método presentado aquí. Aunque, el alcance del presente trabajo se limita a la recuperación de la frecuencia cardíaca y la SPO₂, muchos otros parámetros fisiológicos importantes pueden medirse usando las mismas imágenes.

4 CONCLUSIONES

El presente método permite medir la pulsimetría y la SPO₂ sin contacto de un sujeto; el método es robusto a movimientos o artefactos. Además, los autores estiman que el método propuesto se caracteriza por un algoritmo de costo computacional muy bajo; permitirá su implementación para mediciones en línea de pulsimetría y oximetría en dispositivos móviles estándar.

Como ya se mencionó anteriormente, el presente sistema de medición de pulsimetría y oximetría puede convertirse en base para los sistemas que funcionen por imagen fotoplethysmográfica, por su coste computacional bajo, su gran robustez y eficacia.

Actualmente, se trabaja en la medición de otros parámetros fisiológicos. Se espera en el futuro, seguir mejorando las mediciones mediante el análisis en paralelo de diversas regiones de la piel, un sistema de ponderación y comparación de dichas señales. Finalmente, se está evaluando al método propuesto frente a otros métodos por PPGI y en situaciones más reales, como la medición de estos dos signos vitales de un sujeto en movimiento junto con el sistema y a la vez cambiando de ambientes e iluminación.

Agradecimientos

El trabajo ha sido financiado parcialmente por la Acción Estratégica en Robótica, Visión por ordenador y Automatización; por el proyecto RoboCity2030-III-CM (Robótica aplicada a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos. fase III; S2013/MIT-2748) financiado por Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid y cofinanciado por los Fondos Estructurales de la Unión Europea.

El primer autor agradece al Gobierno Ecuatoriano, por la beca que apoya y financia sus estudios. Su gratitud también a la ayuda directa de los laboratorios de la Universidad Carlos III de Madrid.

Referencias

- [1] W. G. Zijlstra, A. Buursma and W. P. Meeuwse-van der Roest. "Absorption spectra of human fetal and adult oxyhemoglobin, de-oxyhemoglobin, carboxyhemoglobin, and methemoglobin". *Clinical. Chemistry*. Vol. 37, No. 9, pp. 1633-1638, Sep. 1991.
- [2] Y. Mendelson. "Pulse oximetry: Theory and applications for noninvasive monitoring", *Clinical Chemistry*, Vol. 38, No. 9, pp. 1601-1607, Sep. 1992.
- [3] S. Sugino, N. Kanaya, M. Mizuuchi, M. Nakayama and A. Namiki. "Forehead is as sensitive as finger pulse oximetry during general anesthesia", *Canadian Journal of Anesthesia*, Vol. 51, No. 5, pp. 432-436, May 2004.
- [4] A. Jubran. "Pulse oximetry", *Critical Care*, Vol. 3, No. 2, pp. R11, May 1999.
- [5] W. R. Mower, C. Sachs, E. L. Nicklin, P. Safa and L. J. Baraff. "Effect of routine emergency department triage pulse oximetry screening on medical management", *Chest*, Vol. 108, No. 5, pp. 1297-1302, Nov. 1995.
- [6] F. P. Wieringa, F. Mastik and van der Steen, Antonius FW. "Contactless multiple wavelength photoplethysmographic imaging: A first step toward -SpO₂ camera- technology", *Annals of biomedical engineering*, Vol. 33, No. 8, pp. 1034-1041, Mar. 2005.
- [7] L. Kong, Y. Zhao, L. Dong, Y. Jian, X. Jin, B. Li, Y. Feng, M. Liu, X. Liu and H. Wu. "Non-contact detection of oxygen saturation based on visible light imaging device using ambient light", *Optics Express*, Vol. 21, No. 15, pp. 17464-17471, 2013.
- [8] L. Tarassenko, M. Villarroel, A. Guazzi, J. Jorge, D. Clifton and C. Pugh. "Non-contact video-based vital sign monitoring using ambient light and auto-regressive models", *Physiological measurement*, Vol. 35, No. 5, pp. 807, Mar. 2014.
- [9] M. Villarroel, A. Guazzi, J. Jorge, S. Davis, P. Watkinson, G. Green, A. Shenvi, K. McCormick and L. Tarassenko. "Continuous non-contact vital sign monitoring in neonatal intensive care unit", *Healthcare Technology Letters*, Vol. 1, No. 3, pp. 87-91, Sep. 2014.
- [10] U. Bal. "Non-contact estimation of heart rate and oxygen saturation using ambient light", *Biomedical Optics Express*. Vol. 6, No. 1, pp. 86-97, 2015.
- [11] A. R. Guazzi, M. Villarroel, J. Jorge, J. Daly, M. C. Frise, P. A. Robbins and L. Tarassenko. "Non-contact measurement of oxygen saturation with an RGB camera", *Biomedical Optics Express*, Vol. 6, No. 9, pp. 3320-3338, 2015.
- [12] M. Kumar, A. Veeraraghavan and A. Sabharwal. "DistancePPG: Robust non-contact vital signs monitoring using a camera", *Biomedical Optics Express*, Vol. 6, No. 5, pp. 1565-1588, 2015.
- [13] R. Henderson and K. Schulmeister. "Laser Safety", Institute of Physics Publishing, London, 2004.
- [14] V. Kazemi and J. Sullivan. "One millisecond face alignment with an ensemble of regression trees", Presented at Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2014.
- [15] J. M. Bland and D. Altman. "Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement", *The Lancet*, Vol. 327, No. 8476, pp. 307-310, 1986.

Algoritmo de captura de movimiento basado en visión por computador para la teleoperación de robots humanoides.

J.M. GARCIA

RoboticsLab, Universidad Carlos III de Madrid, jgarciah@ing.uc3m.es

S. MARTINEZ

RoboticsLab, Universidad Carlos III de Madrid, scasa@ing.uc3m.es

Resumen

Desde hace tiempo, los seres humanos estamos desarrollando robots que puedan ayudarnos a mejorar nuestra calidad de vida. Esta ayuda puede ofrecerse de distintas maneras, ya sea con la sustitución completa de la persona para eliminar completamente cualquier riesgo o con la idea de compartir distintas tareas. Desde el grupo de investigación RoboticsLab de robots humanoides en la universidad Carlos III de Madrid, estamos empezando a sentar las bases de desarrollo de un robot humanoide con la habilidad de realizar tareas de camarero. Por ello, esta investigación es una primera fase, la cual se centra en la búsqueda de un método de teleoperación que nos permita posteriormente enseñar al robot humanoide comportamientos o trayectorias relacionadas con el ofrecimiento de bebidas. Para ello, a través de la cámara Kinect y sus herramientas, hemos desarrollado un algoritmo de teleoperación basado en RPY (roll-pitch-yaw) para la obtención de los valores de actuación que a posterior se aplicaran sobre el robot humanoide TEO.

Palabras clave: Robot camarero, Visión, Teleoperación, Esqueletización, Roll Pitch Yaw, Kinect.

1. INTRODUCCIÓN

Aprovechando las cualidades que nos ofrece la visión por computador, se pretende asentar las bases para el desarrollo de una base de datos a futuro donde se pueda almacenar diferentes movimientos o trayectorias de manipulación que, a posteriori, un robot humanoide pueda ejecutar de forma autónoma y automática.

La generación de esta base de datos comienza con la implementación de una aplicación que sea capaz de capturar y almacenar los movimientos que realizar una persona. Además, este artículo se quiere enfocar a próximas investigaciones relacionadas con el robot TEO, el cual pretende realizar tareas iguales o parecidas a las de un camarero sirviendo bebidas sobre una bandeja.

Es en este punto donde la teleoperación entra en esta investigación como parte fundamental, para la generación de tareas, movimientos o trayectorias. La posibilidad de teledirigir un brazo articulado de un robot o de un robot humanoide, como es el caso, da la oportunidad de generar nuevas trayectorias aplicables al propio robot. Mediante el uso del procesamiento de imágenes, se creará la recogida de información del teleoperador para, más adelante, aplicar sobre el propio robot [1][7][8].

El objetivo de este artículo se enfoca en la implementación de una aplicación que sea capaz de capturar las características de movimiento del teleoperador a través del uso de una cámara Kinect y generar la información de cómo el robot teleoperado debe moverse para poder imitar el movimiento o trayectoria del teleoperador. Se busca que el movimiento se realice en tres dimensiones y que el robot reproduzca fielmente los movimientos realizados por la persona que se encuentra frente al dispositivo Kinect [3][4]. Para llegar a alcanzar dicho objetivo se dividió el proceso en una serie de sub tareas.

La primera sub tarea está asociada con la detección de detectar una persona mediante el dispositivo Kinect y realizar la esqueletización de la misma. Después, se pasará al cálculo de los ángulos articulares necesarios para que el robot ejecute los movimientos. Por último, se pasarán los ángulos articulares calculados al simulador, mostrándolos en este último caso por pantalla y verificando la validez de estos.

A continuación el artículo se redactará de la siguiente manera. En el siguiente capítulo, se mostrará una breve idea del robot humanoide TEO sobre el que se ha probado los experimentos y la finalidad de ellos. En el tercer capítulo, se podrá ver como es necesario realizar una esqueletización del teleoperador. Después, en el capítulo 4 se explicará todo algoritmo del cálculo cinemático inverso a través del método RPY para el cálculo de los ángulos. Por último, se expondrán los experimentos y sus resultados, juntos con unas conclusiones sobre estos.

2. EL ROBOT HUMANOIDE CAMARERO TEO

En la Universidad Carlos III de Madrid, el grupo de robótica humanoide RoboticsLab[®], ha comenzado a desarrollar un robot humanoide móvil y autónomo TEO (Figura 1), el cual deberá insertarse como robot asistencial o robot personal en una oficina o un entorno de trabajo como un robot camarero. El componente principal de este robot que manipula objetos es su mano la cual lleva una bandeja incorporada.

TEO es la nueva versión que es capaz de caminar en cualquier dirección, sentarse en una silla, subir y bajar escaleras, o moverse por sí mismo en entornos humanos. Con un enfoque diferente, la altura, el peso y la rigidez de enlace se han incrementado. De hecho, pesa aproximadamente 65 kg, tiene una altura de 1,75 m, y tiene 28 grados de libertad. Además, los sistemas hardware y de control son mejores. Por lo tanto, se pueden manejar más información de los sensores y algoritmos de control complejos con una capacidad de cálculo superior. Los principales objetivos de esta investigación han sido la estabilidad del robot humanoide [5] y la generación de caminata o pasos [2][9].

El objetivo de esta investigación es indagar en el área de control con los robots humanoides con un enfoque en el diseño y ejecución de las habilidades de manipulación complejas. En particular, hay que abordar el control de la manipulación basado en el control de visión por ordenador.

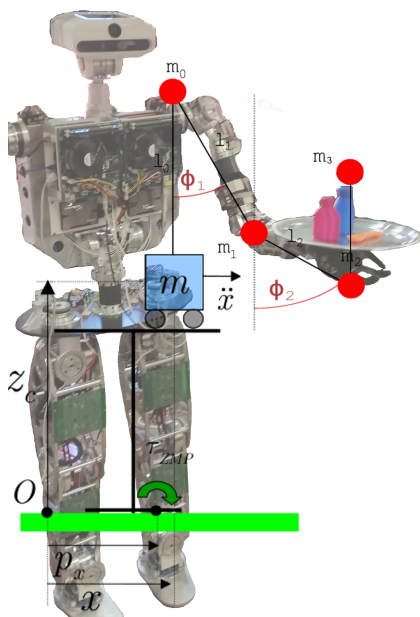


Figura 1: The waiter robot TEO.

3. ESQUELETIZACIÓN

El proceso de esqueletización consta en procesar las imágenes de profundidad obtenidas con Kinect para detectar formas humanas e identificar las partes del cuerpo del usuario, presente en la imagen. Cada parte del cuerpo es abstraída como una coordenada 3D o articulación. Un conjunto de articulaciones forman un esqueleto virtual para cada imagen 24 de profundidad de Kinect, es decir, se obtienen 30 esqueletos por segundo. Las articulaciones generadas varían de acuerdo a la biblioteca de Kinect que se utilice. Para este caso, cada esqueleto como lo indica la figura 18 está formado por 20 articulaciones $ai = xi, yi, zi$ con $zi > 0$ cuyas coordenadas se encuentran expresadas en milímetros con respecto a la posición de Kinect en la escena [6][10][11][12].

La propia esqueletización se debe de encargar de asegurarse que el esqueleto rastreado no tiene partes fuera de la pantalla. Además, es capaz de rastrear de forma activa a dos esqueletos a la vez diferenciándolos y de forma pasiva a otros cuatro. Cada esqueleto será representado por un color diferente.

Los datos que se han obtenido son los puntos que representan partes representativas del cuerpo como centro de la cabeza, pecho o la cadera. Por lo tanto es necesario dibujar segmentos entre los puntos calculados y más tarde cada punto característico será resaltado en un color como se aprecia en la Figura 2.

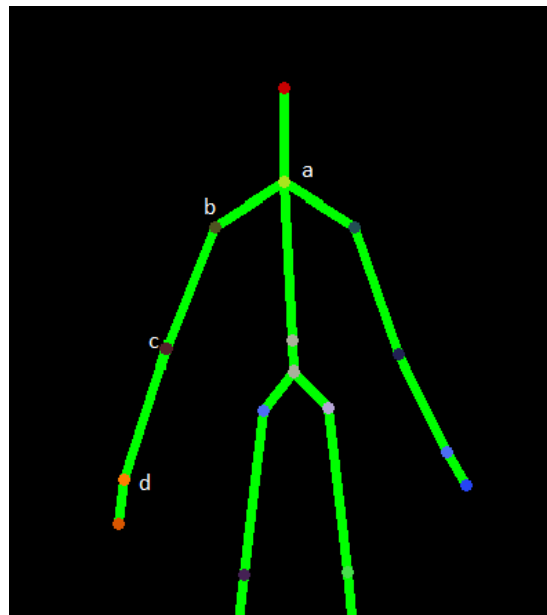


Figura 2: Esqueletización y marcación de las articulaciones características para la tarea de manipulación.

4. TELEOPERACIÓN BASADO EN RPY

Una vez terminado la subtask de la esquelización, el siguiente paso consiste en extraer la información que nos interesa para nuestro proyecto. En este caso se comenzará extrayendo la posición y movimiento del brazo derecho. Para esto se deberá obtener la cinemática inversa de la cadena cinemática compuesta por el codo y el hombro. De forma más concreta, se calcularán varios ángulos, siendo los más importantes el del codo (*angulo_codo*) y el formado entre el bíceps y el torso (*angulo_hombro*) y todo ello en un espacio tridimensional.

El primer paso será localizar los puntos característicos que se necesitan, en este caso serán la base del cuello, el hombro derecho, el codo derecho y la muñeca derecha. Se utilizará los datos del mapa del esqueleto ya preparados para salir por pantalla, por lo tanto se cuenta con que el centro de coordenadas está en la esquina superior izquierda y que no se cuenta con efecto espejo, por lo que el brazo de interés aparecerá en la parte izquierda. Todos los puntos estarán definidos sobre un espacio tridimensional.

Para simplificar la obtención de datos se supondrá los segmentos de la articulación en un plano imaginario. Para sacar el valor de cada ángulo se contará con la posición de los 3 vértices (base del cuello, hombro y codo para el *angulo_hombro* y el hombro, codo y muñeca para el *angulo_codo*). Con estos datos se puede sacar fácilmente los lados del triángulo permitiéndonos obtener los ángulos mediante cinemática inversa como se indica a continuación.

A continuación, se detalla el proceso a seguir los ángulos de rotación tanto de la articulación del hombro como del codo. Ya sea para el hombro o el codo, solo se describe en este artículo que proceso para definir el ángulo únicamente en el plano XY. Para la obtención de los grados en los planos XZ y YZ, los pasos a seguir serán exactamente los mismos pero utilizados los propios datos de cada plano a calcular. Para el caso del hombro contaremos con tres vértices formados por base del cuello, hombro y codo, los cuales forman un triángulo (ABC) del cual podremos sacar sus lados permitiéndonos así obtener los ángulos mediante el método RPY. Utilizando el teorema del coseno se obtiene el ángulo del hombro respecto al codo.

$$AH_{xy} = \arccos \left(\frac{BC_{xy}^2 + AB_{xy}^2 - AC_{xy}^2}{2 * BC_{xy} * AB_{xy}} \right) \quad (1)$$

Donde AH_{xy} es el ángulo entre las rectas AB y BC. AB_{xy} es la distancia entre los puntos A y B. BC_{xy} es la distancia entre los puntos B y C. AC_{xy} es la distancia entre los puntos C y A.

Por otro lado también es necesario calcular el ángulo del hombro respecto al cuello, para posteriormente restárselo. Hay que tener en cuenta también el ángulo formado por la recta que une la base del cuello y el hombro con la horizontal, ya que este no es fijo sino que va disminuyendo a medida que levantamos el brazo y si no lo tenemos en cuenta tendríamos un error en el ángulo del hombro bastante apreciable (Figura 3).

$$ACH_{xy} = \arctan \left(\frac{AB_y}{AB_x} \right) \quad (2)$$

Donde AB_x es la componente X de la recta AB. AB_y es la componente Y de la recta AB.

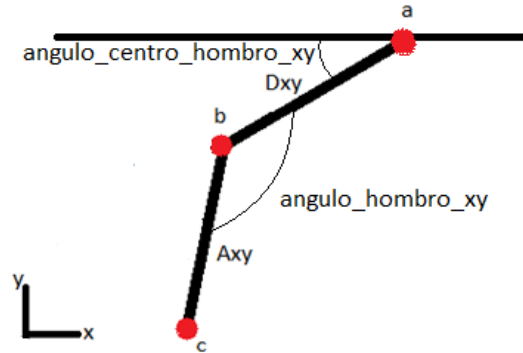


Figura 3: Esquema de la configuración y cálculo de ángulo del hombro respecto del cuello y del codo respecto al hombro.

Por último, para conseguir el valor final del ángulo de lo hombro, es necesario tener en cuenta el problema asociado de codo arriba/elbow up (EU) o codo abajo/elbow down (ED) para la articulación del hombro. Esta situación implica que dependiendo de si el codo se encuentra por encima o por debajo de la prolongación de la recta AB, el comportamiento del sistema será totalmente diferente. En la Figura 4, se muestra este inconveniente que influirá en los cálculos. De esta forma, teniendo en consideración las ecuaciones 1 y 2 y la posición del codo, se obtienen las ecuaciones que definen el ángulo del hombro:

$$EU \Rightarrow H_{xy} = \frac{3\pi}{2} - AH_{xy} - ACH_{xy} \quad (3)$$

$$ED \Rightarrow H_{xy} = AH_{xy} - \pi - ACH_{xy} \quad (4)$$

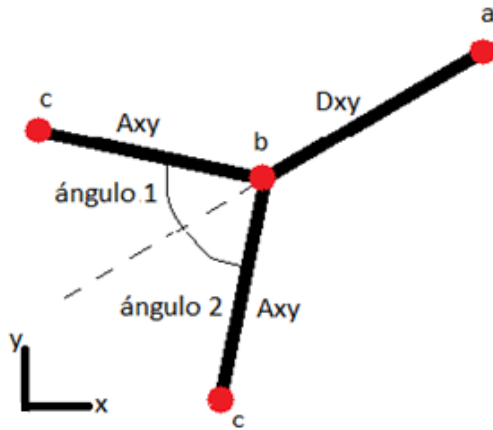


Figura 4: Esquema de la configuración codo arriba o codo abajo.

Una vez calculado el ángulo del hombro, pasamos a obtener el ángulo del codo. Para calcular los ángulos del codo contaremos con tres vértices formados por hombro, codo y muñeca (BCD), los cuales forman un triángulo del cual podremos sacar sus lados permitiéndonos así obtener los ángulos mediante el método RPY. Además hay que tener en cuenta que la muñeca no se ha considerado, por lo tanto, se simplificarán todos los cálculos asociados al codo. Utilizando el teorema del coseno se obtiene el ángulo del codo respecto a la muñeca.

$$AC_{xy} = \pi - \arccos \left(\frac{BC_{xy}^2 + CD_{xy}^2 - BD_{xy}^2}{2 * BC_{xy} * CD_{xy}} \right) \quad (5)$$

Donde AC_{xy} es el ángulo entre las rectas BC y CD. CD_{xy} es la distancia del punto C al D en el plano XY. BD_{xy} es la distancia del punto Bb al D en el plano XY.

5. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Una vez explicado los pasos que a seguir para completar la aplicación, llega el momento de definir los experimentos y evaluar los resultados obtenidos para determinar la fiabilidad del programa. Para ello, aplicaremos todas las trayectorias sobre un simulador del robot humanoide TEO y de esa forma, comprobar lo bien o mal que funcional el algoritmo. Para demostrar la eficacia del programa implementado, se ha realizado dos tiempos de pruebas. La primera está relacionada con la capacidad de obtener unos valores correctos durante el procesamiento de la imagen. Y el segundo está asociado con la velocidad de reacción ante movimientos rápidos por parte del teleoperador.

Por primer experimento se evaluarán los tres ángulos del hombro al mismo tiempo para comprobar que dichos ángulos se corresponden con la realidad. Para ello se empezará con el brazo pegado al tronco y se elevará de forma oblicua hasta que quede paralelo al suelo, es decir, que los ángulos de los planos XY e YZ están a unos 90° , momento en el que se moverá hacia adelante, hacia atrás, y de nuevo hacia adelante hasta quedar en la posición inicial paralelo al suelo, para posteriormente elevarlo pero sin llegar a forzar la articulación. La trayectoria de este movimiento se puede observar en la Figura 5.

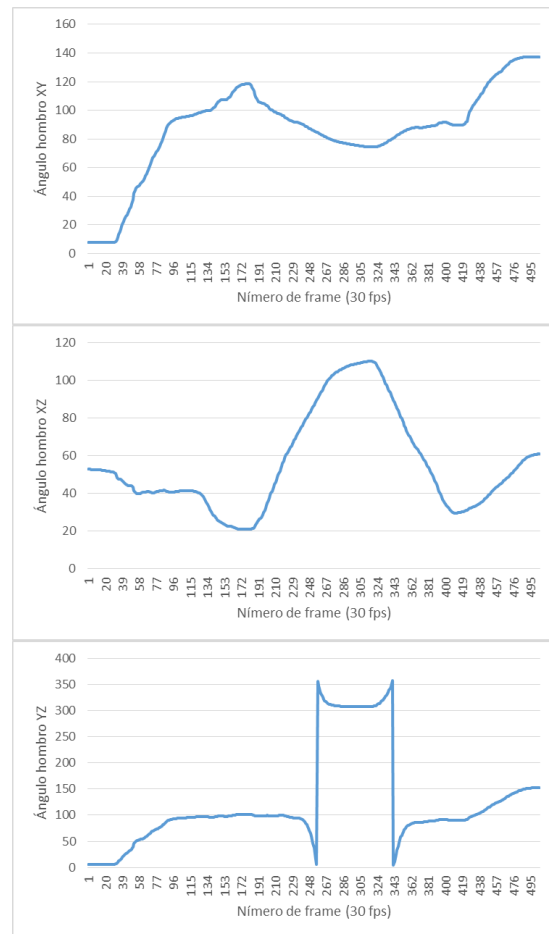


Figura 5: Ángulo del hombro en los planos XY, XZ y YZ para un movimiento compuesto.

Comparando las tres gráficas se puede apreciar el movimiento descrito anteriormente aunque con bastantes irregularidades ante la dificultad física de, por ejemplo, realizar movimientos paralelos al suelo manteniendo la misma altura. Fijándonos en la primera gráfica que describe el movimiento del hombro en el plano XY, se puede observar como partimos de casi 0° , es decir, el brazo pegado al tronco y como a medida que levantamos el brazo el ángulo va aumentando hasta alcanzar la posición deseada rondando los 90° .

Finalmente el ángulo vuelve a aumentar cuando levantamos el brazo para terminar el movimiento. Respecto a la segunda gráfica que representa el movimiento del hombro en el plano XZ, se puede observar que mientras elevamos el brazo de forma oblicua, el ángulo se mantiene próximo a los 45° , que sería el ángulo deseado. Posteriormente realizamos el movimiento hacia adelante con el brazo paralelo al suelo llegando hasta los 20° , luego hacia atrás llegando a los 110° y finalmente tratamos de volver a una posición de 45° aunque, como se aprecia en la gráfica, nos pasamos y llegamos hasta los 25° . Finalmente, al elevar el brazo tratamos de corregir la desviación anterior pasándonos esta vez y llegando hasta los 60° con el brazo ya levantado.

Por último, fijándonos en la última gráfica de la Figura 5 que representa el movimiento del hombro en el plano YZ, se ve como partimos de los 0° que representan el brazo pegado al torso y éstos van aumentando a medida que levantamos el brazo hasta estabilizarse en los 100° mientras realizamos los movimientos horizontales. Además, si comparamos la segunda y la tercera gráfica, se ve cómo en el momento en el que el ángulo del hombro en el plano XZ pasa de los 90° , es decir, el brazo pasa de estar por delante del torso a estar por detrás, el ángulo del hombro en el plano YZ pasa rápidamente de los 100° a casi los 310° . Si el movimiento horizontal fuese perfecto el ángulo debería pasar de 90° a 270° , sin embargo llegamos casi a los 310° debido a que los humanos al mover el brazo hacia atrás paralelo al suelo no podemos y tendemos a bajar el brazo para llegar lo más atrás posible. Cuando el brazo vuelve a estar por delante del torso el ángulo vuelve en este caso a los 90° y a partir de ahí vemos como a medida que levantamos el brazo en el último movimiento, el ángulo va subiendo hasta llegar a los 150° aproximadamente.

Para el segundo experimento, se ha tenido en cuenta los errores que han aparecido debido a la alta frecuencia de muestreo (30fps). Aunque en los experimentos anteriores se haya tomado una frecuencia muy alta, con la cual se es capaz de seguir movimientos muy bruscos, es necesario eliminar los errores producidos para movimiento bruscos. Para ello, se ha aplicado un filtro de paso bajo. Se ha mantenido las mismas condiciones que en el experimento anterior, y además se añade un filtro de paso bajo.

Como se observa en la Figura 6 y en primer lugar, el sistema es capaz de seguir el movimiento del brazo fielmente. Manteniendo esa velocidad de muestreo de 30 fps, la respuesta del sistema es bastante robusta, pues es capaz de leer de manera

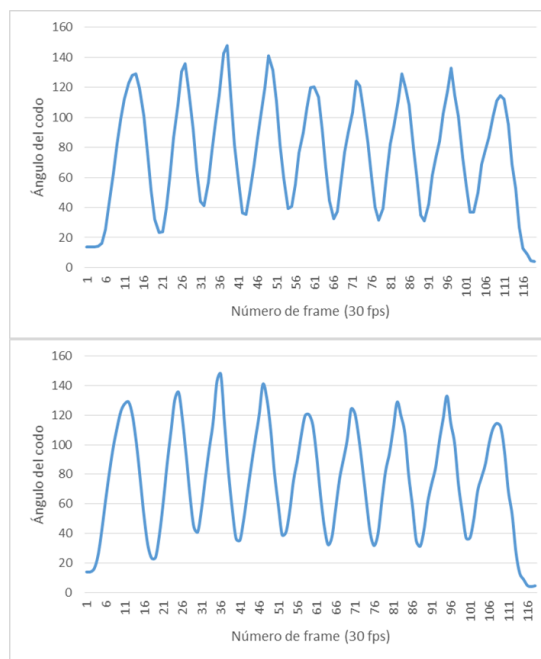


Figura 6: Ángulo del codo para movimientos de alta frecuencia con y sin un filtro paso bajo.

correcta el ángulo (en este caso el del codo) de manera precisa. Y en segundo lugar, además se aprecia que las anomalías o errores antes descritos se mitigan gracias al filtro paso bajo aplicado, dejando el movimiento mucho más constante y suave, y por tanto, más favorable para la posterior teleoperación del robot.

6. CONCLUSIONES

El desarrollo del proyecto ha servido para descubrir las enormes posibilidades que ofrece el sensor Kinect para llevar a cabo todo tipo de funciones relacionadas con la visión artificial. Sus capacidades no solo ofrecen buenos resultados a la hora de capturar a un usuario, también es capaz de funcionar como sensor de visión en cualquier robot que necesite captar y analizar su entorno. Esto es interesante, pues con la visión foveal que tienen los seres humanos, podemos bioinspirarnos para controlar los alrededores del robot y además interactuar con sus funciones de camarero.

En cuanto al sistema de teleoperación, el sistema se comporta de forma robusta en primer lugar ante cualquier tipo de movimiento ya sea en el plano XY, XZ o YZ. En cualquiera de los casos, se ha conseguido un seguimiento correcto. Y en segundo lugar ante movimientos con hasta velocidades de $20^\circ/\text{s}$, el sistema ha recodificado fielmente cada uno de los ángulos del brazo. Lo que permite asegurar que los datos sean fiables independientemente de la velocidad de acción de teleoperador.

Como trabajos futuros, el siguiente paso consistirá en desarrollar una cadena cinemática más compleja donde se tenga en consideración tanto el movimiento de la muñeca, como la consideración de la orientación del TCP (Tool Center Point). Esto permitirá dar más versatilidad a los movimientos. Otro paso a dar será la generación de nuevos movimientos más adecuados con las de un robot camarero. Esta base de datos permitirá elaborar a su vez comportamientos más complejos, los cuales darán naturalidad al comportamiento del robot.

Agradecimientos

The research leading to these results has received funding from the ROBOHEALTH-A project (DPI2013-47944-C4-1-R) funded by Spanish Ministry of Economy and Competitiveness and from the RoboCity2030-III-CM project (S2013/MIT-2748), funded by Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid and cofunded by Structural Funds of the EU.

Referencias

- [1] Alfaro Ballesteros, S. (2012). Sistema de teleoperación mediante una interfaz natural de usuario (Master's thesis).
- [2] Arbulú, M., and Balaguer C.. Real-Time Gait Planning for the Humanoid Robot Rh-1 Using the Local Axis Gait Algorithm. *International Journal of Humanoid Robotics*, 2009, Vol. 6.01, pp. 71-91.
- [3] Dai, X., Wu, M., Davidson, B., Mahoor, M., & Zhang, J. (2013, September). Image-based fall detection with human posture sequence modeling. In *Healthcare Informatics (ICHI)*, 2013 IEEE International Conference on (pp. 376-381). IEEE.
- [4] García, M. A., Cárdenas, A., Rendón, J. M., & Maya Méndez, M. (2009). Una Plataforma de Control Basado en Visión para la Rehabilitación de Robots Manipuladores de Tipo Industrial. *Computación y Sistemas*, 12(4), 409-420.
- [5] Kaynov, D., et al. A practical decoupled stabilizer for joint-position controlled humanoid robots. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2009)*, St. Louis, USA, 2009; IEEE, pp. 3392 - 3397.
- [6] Marcos Viforcós, E. (2012). Aplicación de las cámaras 3D al reconocimiento de actividades (Bachelor's thesis).
- [7] Montiel, O. P. (2008). Manipulador teleoperado inalámbricamente. Universidad de las Américas Puebla.
- [8] Ortega, E. N., & Villaluenga, L. B. (2004). Teleoperación: técnicas, aplicaciones, entorno sensorial y teleoperación inteligente. *Reports de recerca de l'Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials*, (5), 1.
- [9] Pardos, J.M., and Balaguer C.. Humanoid robot kinematics modeling using lie groups. *Climbing and Walking Robots*, Springer Berlin Heidelberg, 2005, pp. 569-575.
- [10] Plagemann, C., Ganapathi, V., Koller, D., & Thrun, S. (2010, May). Real-time identification and localization of body parts from depth images. In *Robotics and Automation (ICRA)*, 2010 IEEE International Conference on (pp. 3108-3113). IEEE.
- [11] Shotton, J., Sharp, T., Kipman, A., Fitzgibbon, A., Finocchio, M., Blake, A., & Moore, R. (2013). Real-time human pose recognition in parts from single depth images. *Communications of the ACM*, 56(1), 116-124.
- [12] Webster, D., & Celik, O. (2014, February). Experimental evaluation of Microsoft Kinect's accuracy and capture rate for stroke rehabilitation applications. In *Haptics Symposium (HAPTICS)*, 2014 IEEE (pp. 455-460). IEEE.

COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE DETECCIÓN DE ROSTROS EN IMÁGENES DIGITALES

Natalia García del Prado¹, Víctor González-Castro^{1,2}, Enrique Alegre^{1,2}, Eduardo Fidalgo Fernández^{1,2}

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Sistemas y Automática, Universidad de León, España

² Investigador en INCIBE (Instituto Nacional de Ciberseguridad)
ngarcd00@estudiantes.unileon.es, {vgonc, ealeg, efidf}@unileon.es

Resumen

En este trabajo se realiza la evaluación de tres métodos de detección de rostros con cuatro conjuntos de imágenes utilizados en la literatura relacionada con este problema. Los métodos evaluados son el método de detección de objetos de Viola & Jones, un método basado en una modificación de HOG implementado en la librería DLib, y un método basado en Redes Neuronales Convolucionales llamado Multi-task Cascaded Convolutional Neural Networks (MTCNN). Los resultados obtenidos con los conjuntos de datos evaluados indican que el método que mejores resultados globales ha obtenido ha sido MTCNN, tanto en términos de FScore como en recall, i.e. tasa de verdaderos positivos.

Palabras clave: Detección de rostros, Viola & Jones, DLib, MTCNN.

1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años se ha producido un gran auge en aplicaciones de detección de rostros utilizando procesamiento de imágenes digitales y reconocimiento de patrones. Una de las razones que ha llevado a este crecimiento son las necesidades cada vez mayores de esta tecnología en aplicaciones de seguridad y vigilancia utilizadas en diferentes ámbitos. Pero también en el campo de las aplicaciones de dispositivos móviles está siendo de vital importancia ya que muchas de estas apps utilizan la detección de rostros en una fotografía o en un video (p. ej., Snapchat).

Existe un gran número de áreas en las que se desarrollan programas para la detección automática de rostros, bien con el único objetivo de la detección o como paso previo al reconocimiento de los mismos, y requieren la mayor precisión posible. En el campo de la seguridad, por ejemplo, la detección automática de rostros puede ser de gran ayuda para los investigadores ya que permite el filtrado automático de imágenes o videos en función de la presencia o no de rostros.

El principal objetivo de este artículo es el estudio

de varios métodos del estado del arte en detección de rostros y la evaluación de los resultados obtenidos al ejecutarlos contra varios conjuntos de imágenes para verificar cuál de ellos es el que mejor funciona y el que detecta mayor número de rostros. Estos resultados pueden aportar mucha información previa al desarrollo de programas que impliquen una detección precisa del rostro, pues permitirá implementar el método más adecuado.

Existen muchos campos en los que se aplica la detección facial, tales como la extracción de contenido de imagen, codificación de video, videoconferencia, etc., aplicaciones de videovigilancia e interfaces computadora-humano. Otro campo a destacar donde se utiliza la detección de rostros son los sistemas de autenticación biométrica, como los sistemas de autenticación mediante reconocimiento facial, que se investigan activamente para las aplicaciones de control de acceso y seguridad. Además, la detección de rostros también se emplea en el área del entretenimiento (p. ej., videojuegos, realidad virtual, álbumes de fotos, maquillaje virtual, aplicaciones de Smartphone, etc.).

En este trabajo se han evaluado diferentes métodos de detección de rostros: (a) el algoritmo de Viola-Jones [1], (b) el método de detección de rostros propuesto por Kazemi y Sullivan [2] implementado en la librería Dlib y (c) el método Multi-task Cascaded Convolutional Neural Networks (MTCNN) [3]. En esta evaluación se han utilizado varios conjuntos de datos públicos: FDDB [4], WIDER FACE [5], MALF [6] y AFW [7].

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera: En la Sección 2 se realiza un breve repaso a los antecedentes y el estado del arte de métodos de detección de rostros. A continuación, en la Sección 3 se explican brevemente los métodos que se han evaluado y los conjuntos de datos usados en dicha evaluación. Los experimentos y sus resultados son explicados y discutidos en la Sección 4 y, finalmente, las conclusiones se exponen en la Sección 5.

2. ESTADO DEL ARTE

La detección de rostros se lleva desarrollando desde hace varias décadas. En la de 1950 se realizaron los primeros experimentos sobre detección de rostros desde el punto de vista de la psicología [8]. Tras estos se realizaron otras investigaciones como las interpretación de las diversas expresiones de la cara, la interpretación de las emociones o la percepción de gestos.

Durante las décadas de los 70 y 80 del siglo pasado se utilizaban plantillas y mediciones de características geométricas de partes del rostro para detectar y reconocer caras [9]. El estudio sobre la detección de rostros continuó desde entonces: por ejemplo, en 1994 Yang y Huang [10] propusieron un método jerárquico basado en conocimiento que va refinando la detección del rostro en cada etapa. Li y colaboradores presentaron un método para detectar y seguir rostros en vídeos en color utilizando detección de la piel a través del color junto con un modelo facial para detectar rostros dentro de regiones de la piel [11]. Viola y Jones presentaron un método de detección de objetos [1] que también serviría para detección de rostros que, aún hoy, es muy utilizado. Por ejemplo, para aplicaciones como videovigilancia e interfaces computadora-humano, Kim y colaboradores propusieron en el año 2002 un método para detectar y rastrear caras [12]. Este método se aplicó en la región candidata extraída por el movimiento, el color y la información de aspecto global. A continuación, las características extraídas de estas regiones candidatas mediante análisis de componentes independientes (ICA en sus siglas en inglés) se clasificaron mediante máquinas de vectores de soporte (SVM en sus siglas en inglés). Los experimentos se realizaron tanto en imágenes en escala de gris como en secuencias de vídeo en color, obteniendo tasas de detección del 91 %, con muy pocas falsas alarmas, i.e. falsos positivos.

Con la aparición del Aprendizaje Profundo (*Deep Learning*) se han comenzado a utilizar Redes Neuronales Convolucionales a la detección de rostros, con muy buenos resultados [3, 13, 14].

3. MÉTODOS

En esta sección se describirán brevemente los métodos evaluados en el presente trabajo.

3.1. ALGORITMO VIOLA & JONES

El algoritmo clásico de Viola & Jones [1] es uno de los algoritmos más utilizado en la detección de rostros debido a su robustez y velocidad. Trabaja con funciones que, mediante el uso de regiones rectan-

gulares de diversos tamaños, buscan el rectángulo más pequeño que es el que contendrá la cara que se busca.

Se basa en extraer características de la imagen basadas en la sustracción de los valores de intensidad de los pixels de la imagen en una región rectangular. Específicamente se resta la suma de los niveles de gris de los pixels que se encuentran bajo la parte blanca del rectángulo menos los que se encuentran bajo la parte negra (ver ejemplos en la Figura 1). Estas características se llaman características Haar pues los rectángulos empleados son una reminiscencia de las funciones base de Haar [1].

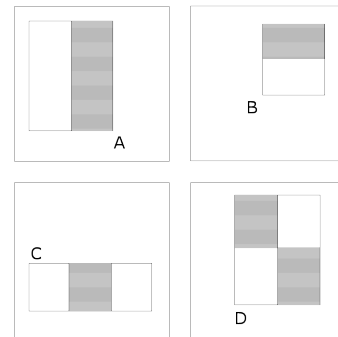


Figura 1: Ejemplos de regiones rectangulares empleadas en la extracción de las características Haar.

El cálculo de estas características se puede realizar rápidamente gracias a la utilización de la *imagen integral* [1]. Dada una imagen i , su integral I en el punto (x, y) se calcula sumando todos los pixels a la izquierda y por encima de (x, y) (ver Ecuación (1)).

$$I(x, y) = \sum_{x' \leq x, y' \leq y} i(x', y') \quad (1)$$

El número de características así calculadas incluso para una región pequeña es muy alta, y solo un pequeño conjunto de las mismas es útil para la detección. Por ello, se emplea Adaboost para reducir el número de características.

Por último, se utiliza una cascada de clasificadores para evaluar las diferentes ventanas, de modo que si alguno de los clasificadores de la cascada falla, se descarta la existencia de un rostro en la subventana evaluada, de manera que la velocidad del método se incrementa.

3.2. ALGORITMO DE DETECCIÓN DE ROSTROS IMPLEMENTADO EN LIBRERÍA DLIB

Este detector está basado en un clasificador que utiliza características basadas en una variante [15]

de histogramas de gradientes orientados (HOG) [16] extraídas de ventanas deslizantes de tamaño fijo operando sobre pirámides de imágenes.

Una vez detectado el rostro se puede utilizar el método de Kazemi y Sullivan [2] para detectar la pose de la cara mediante la detección de puntos característicos de la misma, o *landmarks* (ver Figura 2). Sin embargo, en este trabajo solo se ha utilizado para detectar caras en posición frontal para compararlo con el método de Viola & Jones.

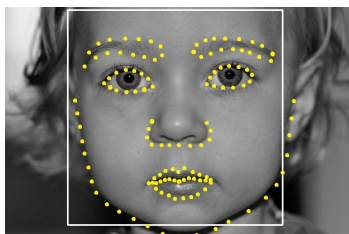


Figura 2: Ejemplos de puntos característicos detectados en un rostro.

3.3. MULTI-TASK CASCADED CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS (MTCNN)

Zhang y colaboradores propusieron la utilización de una cascada de Redes Neuronales Convolucionales para detectar rostros y *landmarks* en los mismos [3], que consta de tres etapas. Antes de comenzar, se redimensiona la imagen a diferentes escalas para construir una pirámide de imágenes. En la primera etapa se utiliza una red convolucional que detecta ventanas de caras candidatas. A continuación, se utiliza otra red neuronal convolucional que descarta un gran número de candidatos en los que no existen rostros. Finalmente una última red convolucional trata de identificar en cuáles de los candidatos existe realmente un rostro, identificando las posiciones de cinco puntos de referencia faciales: uno en cada ojo, otro en la punta de la nariz y los dos restantes en las comisuras de los labios.

4. EXPERIMENTOS

4.1. DATASETS UTILIZADOS

4.1.1. Fddb: Face Detection Data Set Benchmark

Fddb es un conjunto de imágenes de regiones faciales diseñada para estudio de los problemas de la detección de rostros sin restricciones [4]. Este conjunto de datos contiene las anotaciones para 5171 caras en un subconjunto del dataset “Faces in the Wild” que consta de 2845 imágenes.

4.1.2. WIDER FACE

El conjunto de datos WIDER FACE [5] consta de 32.203 imágenes con 393.703 caras anotadas con un alto grado de variabilidad en escala, pose y oclusión extraídas del conjunto de datos público WIDER. El conjunto de imágenes WIDER FACE se organiza en 61 clases de eventos muy diversos, como imágenes de desfiles de bandas, manifestaciones, conferencias de prensa, reuniones familiares o incluso funerales. En este trabajo se ha utilizado un subconjunto de imágenes que contienen unas 40200 caras anotadas.

4.1.3. MALF: Multi-Attribute Labelled Faces

MALF es un conjunto abreviado de imágenes cuyas etiquetas contienen múltiples atributos faciales recopilados y proporcionados por el Centro de Biometría y de Investigación de Seguridad [6]. MALF es el primer conjunto de datos de detección de rostros que soporta una evaluación fina ya que contiene 5.250 imágenes tomadas en entornos reales con un total de 11.931 caras. Sin embargo, en este trabajo se ha utilizado un subconjunto de 250 imágenes para las que se tenía la anotación del *ground truth* que contienen unos 600 rostros.

4.1.4. AFW: Annotated Facial in the Wild

AFW [7] contiene 205 imágenes con 473 caras etiquetadas. Para cada cara, las anotaciones incluyen un rectángulo circunscrito (*bounding box*), 6 puntos de referencia y los ángulos de la postura. Este dataset, por lo tanto, permite evaluar métodos tanto de detección de rostros como de estimación de posición y de hitos en imágenes desordenadas del mundo real.

4.2. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Se han probado los tres métodos indicados en las secciones 3.1, 3.2 y 3.3 con cada uno de los cuatro conjuntos de imágenes comentados en la sección 4.1. Cuando el método evaluado detecta un rostro, el *bounding box* que devuelve se compara con la de la *ground truth* del conjunto de imágenes. La comparación se realiza evaluando la proporción de la superficie de intersección de ambos *bounding boxes* sobre el área total del *ground truth*, de modo que si esta es mayor que un determinado umbral, se considera el rostro como bien detectado. En caso contrario se considera que el rostro no se detecta. El umbral que se ha establecido en este trabajo ha sido 0.7.

Sean TP, FP y FN el número de verdaderos po-

sitivos (i.e., el número de rostros detectados correctamente), falsos positivos (i.e., el número de veces que se detecta un rostro donde en realidad no existe) y falsos negativos (i.e., el número de rostros que no se detectan), respectivamente. Las métricas de error utilizadas en este trabajo han sido:

- *Precision*: Indica la tasa de rostros que detecta correctamente entre todos los elementos que detecta como un rostro.

$$precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

- *Recall*: Indica la tasa de rostros detectados correctamente detectados sobre el total de rostros que se encuentran realmente en las imágenes.

$$recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

- *FScore*: Sean P y R la *precision* y *recall*, respectivamente. El FScore es la media armónica de P y R .

$$FScore = 2 \frac{P \cdot R}{P + R} \quad (4)$$

A continuación se discuten los resultados obtenidos con cada uno de los datasets evaluados.

4.2.1. Resultados con el dataset FDDB

Se han evaluado los tres métodos con todas las imágenes del conjunto FDDB (i.e., 2845 imágenes que contienen 5171 rostros). En la Tabla 1 se muestran los resultados utilizando un umbral para la detección del rostro de 0.7.

Tabla 1: Resultados de los métodos evaluados con el dataset FDDB.

	Recall	Precision	FScore
Viola & Jones	0.63	0.92	0.75
DLib	0.56	0.99	0.71
MTCNN	0.77	0.93	0.84

Globalmente, el método MTCNN es el mejor de los tres evaluados con este dataset ya que el FScore que consigue mejora al del obtenido por los otros dos métodos. La tasa de verdaderos positivos (i.e. *recall*) es notablemente superior respecto a los otros métodos, lo que indica que es el que más rostros detecta correctamente. Además, el hecho de que obtenga menor *precision* que el método incluido en la librería DLib indica que detecta más elementos de la imagen como rostros que no son rostros (i.e., más falsos positivos) que este.

En la Figura 3 se muestran los *recalls* de los diferentes métodos en función de los diferentes umbrales evaluados (i.e. 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 y 0.9).

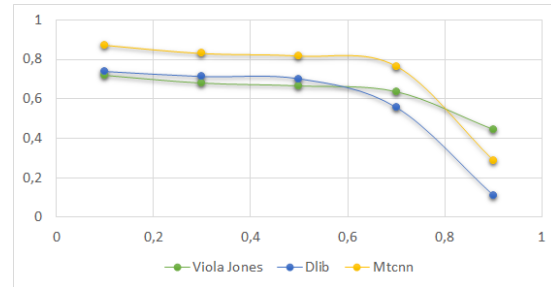


Figura 3: *Recall* obtenido por los diferentes métodos en el dataset FDDB con umbrales de detección diferentes.

En la Figura 3 se puede comprobar que MTCNN tiene mayor *recall* (i.e., tasa de verdaderos positivos) en todos los escenarios excepto en el más restrictivo (i.e. aquél en el que se exige que el 90 % de la superficie del rectángulo de la cara detectada esté superpuesto al del *ground truth* del *dataset*).

4.2.2. Resultados con el dataset WIDER FACE

También se han evaluado los tres métodos con el conjunto de imágenes WIDER FACE. Como se indicó en la sección 4.1.2 se ha utilizado un subconjunto de imágenes que consta de unas 40200 rostros anotados. En la Tabla 2 se muestran los resultados utilizando un umbral para la detección del rostro de 0.7.

Tabla 2: Resultados de los métodos evaluados con el subconjunto del dataset WIDER FACE.

	Recall	Precision	FScore
Viola & Jones	0.14	0.86	0.23
DLib	0.11	0.99	0.20
MTCNN	0.36	0.96	0.53

Una vez más, el método MTCNN ha obtenido mejores resultados globalmente que los otros dos métodos (*FScore* de 0.53 y *recall* de 0.36), si bien los resultados con este dataset no han resultado tan buenos como con FDDB.

En la Figura 4 se muestran los *recalls* de los diferentes métodos en función de los diferentes umbrales evaluados (i.e. 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 y 0.9).

En el caso de WIDER, MTCNN obtiene un *recall* superior a los otros dos métodos con todos los umbrales de detección evaluados.

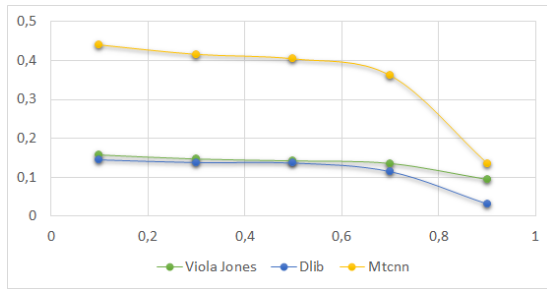


Figura 4: *Recall* obtenido por los diferentes métodos en el dataset WIDER con umbrales de detección diferentes.

4.2.3. Resultados con el dataset MALF

Se han evaluado los tres métodos con un subconjunto de 250 imágenes extraídas del conjunto de imágenes MALF. En la Tabla 3 se muestran los resultados utilizando un umbral para la detección del rostro de 0.7.

Tabla 3: Resultados de los métodos evaluados con el dataset MALF.

	Recall	Precision	FScore
Viola & Jones	0.47	0.86	0.61
DLib	0.48	0.99	0.64
MTCNN	0.57	0.90	0.70

Siguiendo la misma tendencia, el método MTCNN ha obtenido mejores resultados que los otros dos métodos (*FScore* de 0.70 y *recall* de 0.57). En la Figura 5 se muestran los *recalls* de los diferentes métodos en función de los diferentes umbrales evaluados (i.e. 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 y 0.9).

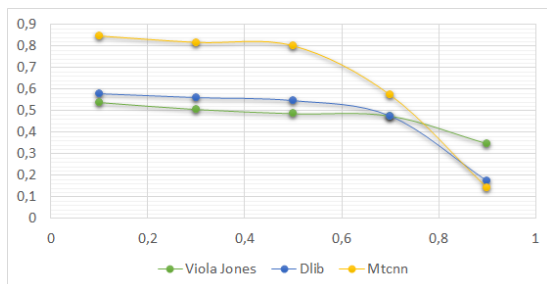


Figura 5: *Recall* obtenido por los diferentes métodos en el dataset MALF con umbrales de detección diferentes.

Una vez más, MTCNN obtiene una tasa de rostros detectados correctamente superior a los otros dos métodos en todos los escenarios excepto en el más restrictivo.

4.2.4. Resultados con el dataset AFW

Finalmente, se han evaluado los tres métodos con con todas las imágenes del conjunto AFW (i.e., 205 imágenes con 473 rostros etiquetados). En la Tabla 4 se muestran los resultados utilizando un umbral para la detección del rostro de 0.7.

Tabla 4: Resultados de los métodos evaluados con el dataset AFW.

	Recall	Precision	FScore
Viola & Jones	0.67	0.57	0.62
DLib	0.66	0.98	0.79
MTCNN	0.94	0.69	0.80

El comportamiento de los diferentes métodos evaluados es el mismo que en el caso de los otros datasets: MTCNN obtiene mejores resultados globales que los otros, aunque en este caso el *FScore* de MTCNN y del método implementado en la librería DLib es similar. En la Figura 6 se muestran los *recalls* de los diferentes métodos en función de los diferentes umbrales evaluados (i.e. 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 y 0.9).

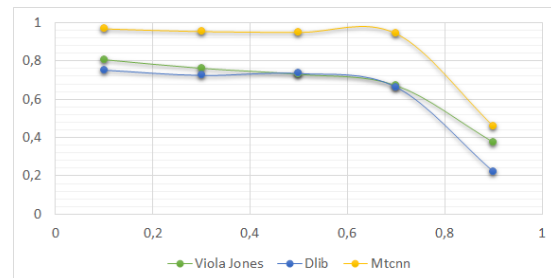


Figura 6: *Recall* obtenido por los diferentes métodos en el dataset AFW con umbrales de detección diferentes.

Siguiendo la misma tendencia, MTCNN obtiene *recalls* superiores a los otros dos métodos para todos los umbrales de detección.

5. CONCLUSIÓN

En este trabajo se han evaluado tres métodos de detección de rostros: el algoritmo de detección de objetos propuesto por Viola & Jones, un método basado en una variante de HOG implementado en la librería DLib y, por último, el método Multi-task Cascaded Convolutional Neural Networks (MTCNN). El rendimiento de estos tres métodos en la tarea de detección de rostros se ha comparado utilizando cuatro conjuntos de imágenes disponibles públicamente diferentes ampliamente utilizadas en la literatura: FDDB, WIDER FACE, MALF y AFW.

En todos los casos el método que mejor rendimiento global ha obtenido ha sido MTCNN. Tanto el FScore como el *recall* (i.e. la tasa de verdaderos positivos) han sido superiores usando MTCNN en todos los conjuntos de datos. Por otro lado, llama la atención que el método implementado en la librería DLib obtiene mejor *precision* en todos los casos. Esto se debe a que el número de falsos positivos (i.e. detecciones de caras donde no existen rostros) que detecta este método es menor que el de MTCNN. Por otro lado, el método de Viola & Jones y el implementado en la librería DLib presentan resultados similares en cuanto a *recall* aunque el FScore de este último es algo superior. Una de las mayores limitaciones del método de Viola & Jones es que en este trabajo se ha utilizado solo la cascada de clasificadores Haar para detectar rostros frontales. Es posible que, combinando esta con la cascada para detectar rostros de perfil se lograsen mejorar los resultados de este método.

En futuros trabajos se tratará de aplicar la detección de rostros a diferentes aplicaciones (p. ej., conteo de personas en eventos o transporte público), o aplicar reconocimiento de los rostros detectados o incluso evaluar de manera automática las emociones de una persona determinada mediante el análisis de sus gestos.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el acuerdo marco entre la Universidad de León e INCI-BE (Instituto Nacional de Ciberseguridad) bajo la adenda 22.

Referencias

- [1] Paul Viola and Michael Jones. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2001. CVPR 2001. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on*, volume 1, pages I–I. IEEE, 2001.
- [2] Vahid Kazemi and Josephine Sullivan. One millisecond face alignment with an ensemble of regression trees. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 1867–1874, 2014.
- [3] Kaipeng Zhang, Zhanpeng Zhang, Zhifeng Li, and Yu Qiao. Joint face detection and alignment using multitask cascaded convolutional networks. *IEEE Signal Processing Letters*, 23(10):1499–1503, 2016.
- [4] Vidit Jain and Erik G Learned-Miller. Fddb: A benchmark for face detection in unconstrained settings. *UMass Amherst Technical Report*, 2010.
- [5] Shuo Yang, Ping Luo, Chen-Change Loy, and Xiaoou Tang. Wider face: A face detection benchmark. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 5525–5533, 2016.
- [6] Bin Yang, Junjie Yan, Zhen Lei, and Stan Z Li. Fine-grained evaluation on face detection in the wild. In *Automatic Face and Gesture Recognition (FG), 2015 11th IEEE International Conference and Workshops on*, volume 1, pages 1–7. IEEE, 2015.
- [7] Xiangxin Zhu and Deva Ramanan. Face detection, pose estimation, and landmark localization in the wild. In *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012 IEEE Conference on*, pages 2879–2886. IEEE, 2012.
- [8] Jerome S Bruner and Renato Tagiuri. The perception of people. Technical report, DTIC Document, 1954.
- [9] Mark Nixon. Eye spacing measurement for facial recognition. In *29th Annual Technical Symposium*, pages 279–285. International Society for Optics and Photonics, 1985.
- [10] Guangzheng Yang and Thomas S Huang. Human face detection in a complex background. *Pattern Recognition*, 27(1):53 – 63, 1994. ISSN 0031-3203.
- [11] Y. Li, A. Goshtasby, and O. Garcia. Detecting and tracking human faces in videos. In *Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition. ICPR-2000*, volume 1, pages 807–810 vol.1, 2000.
- [12] Tae-Kyun Kim, Sung-Uk Lee, Jong-Ha Lee, Seok-Cheol Kee, and Sang-Ryong Kim. Integrated approach of multiple face detection for video surveillance. In *Pattern Recognition, 2002. Proceedings. 16th International Conference on*, volume 2, pages 394–397. IEEE, 2002.
- [13] Qin-Qin Tao, Shu Zhan, Xiao-Hong Li, and Toru Kurihara. Robust face detection using local cnn and svm based on kernel combination. *Neurocomputing*, 211:98 – 105, 2016. ISSN 0925-2312. SI: Recent Advances in SVM.
- [14] Shaohui Lin, Ling Cai, Xianming Lin, and Rongrong Ji. Masked face detection via a modified lenet. *Neurocomputing*, 218:197 – 202, 2016. ISSN 0925-2312.
- [15] Pedro F Felzenszwalb, Ross B Girshick, David McAllester, and Deva Ramanan. Object detection with discriminatively trained part-based models. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 32(9):1627–1645, 2010.

- [16] Navneet Dalal and Bill Triggs. Histograms of oriented gradients for human detection. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference on*, volume 1, pages 886–893. IEEE, 2005.

LOCALIZACIÓN DEL PUNTO DE FUGA PARA SISTEMA DE DETECCIÓN DE LÍNEAS DE CARRIL.

M. Ibarra-Arenado^{1,2}, T. Tjahjadi³, S. Robla-Gómez², J.M. Pérez-Oria²

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, Santander, Cantabria, Avda. los Castros s/n, 39005, SPAIN

² Departamento de Tecnología Electrónica e Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Cantabria, Santander, Cantabria, Avda. los Castros s/n, 39005, SPAIN

³ School of Engineering, University of Warwick, Coventry CV4 7AL, UNITED KINGDOM
E-mail: [ibarra,srobla,oria]@teisa.unican.es, t.tjahjadi@warwick.ac.uk

Resumen

Una tarea fundamental dentro de los sistemas de detección de cambio de carril involuntario es la detección de las marcas viales longitudinales pintadas en el asfalto, ya sean continuas o discontinuas, así como de los límites de la vía. Los métodos de detección de estas características de la carretera basados en visión por computador, se dividen generalmente en dos etapas: extracción de las potenciales marcas viales longitudinales y ajuste de éstas a un modelo matemático. El presente artículo se centra en la primera, presentando un método para la detección del punto (vía recta) o puntos (vía curva) de fuga de la imagen. Los bordes de imagen cuya proyección pase por el punto de fuga, pertenecen a potenciales líneas de carril o límites de la carretera, siendo por lo tanto dicho punto una característica importante para la comprensión de la escena y detección del carril. Tras un filtrado basado en la orientación de los bordes de la imagen, los puntos de fuga se obtienen a partir de un proceso iterativo por votación. Ensayos realizados en tráfico urbano real muestran un comportamiento eficiente del método.

Palabras Clave: Visión por computador, detección de carril, sistemas de ayuda a la conducción.

1 INTRODUCCIÓN

Con el fin de evitar accidentes debidos a cambios de carril involuntarios, incluyendo salidas de la vía e invasiones tanto del carril contrario como del contiguo, los sistemas de detección de cambio de carril (Lane Departure Warning, LDW) ayudan a mantener la trayectoria del vehículo dentro de la vía. Ante un posible cambio involuntario de carril, los sistemas LDW alertan al conductor mediante una señal sonora y/o acústica, o incluso haciendo vibrar el volante o el asiento del conductor. Una versión más avanzada son los sistemas de asistencia al mantenimiento de carril (Lane Keep Assistance, LKA), los cuales actúan sobre la dirección del vehículo, corrigiendo la trayectoria cuando el conductor no responde a las alertas

que le envía el sistema.

Una tarea fundamental dentro de los sistemas LDW y LKA es la detección de las marcas viales longitudinales pintadas en el asfalto, ya sean continuas o discontinuas, las cuales proporcionan la posición y orientación del vehículo dentro de la vía. Actualmente, los sistemas basados en visión por computador están jugando un papel muy importante dentro de los sistemas de ayuda a la conducción (Advanced Driver Assistance Systems, ADAS). Las cámaras de bajo coste en comparación con otros dispositivos como el LIDAR, las unidades de procesamiento cada vez más potentes, los avances en los campos tanto del procesamiento de imagen como de la visión por computador, junto con el hecho de que los sensores ópticos son pasivos quedando exentos de los problemas de interferencia propios de los sensores activos, hace que los sistemas basados en visión sean un segmento creciente dentro de los sistemas ADAS.

Sin embargo, la detección de las líneas del carril mediante visión por computador supone un gran desafío. Aunque muchos métodos han sido propuestos, todavía es un campo de investigación activo, donde los esfuerzos se dirigen a lograr sistemas más fiables y rápidos. Son diversos los factores que dificultan la detección de las líneas de carril en una imagen. Por un lado, el ego-vehículo (vehículo en el que el sistema está instalado) está en movimiento, por lo que el escenario además de ser desconocido, está constantemente cambiando. Esto junto con la complejidad propia de la estructura de la carretera (rectas, curvas, cruces, rotondas, etc.) dificulta considerablemente la interpretación de la escena. Por otro lado, las marcas viales no son siempre visibles, lo cual puede deberse al desgaste de la vía, a parches en el asfalto o a la presencia de vehículos que las ocultan. Finalmente, los sistemas LDW y LKA operan en exteriores, estando muy condicionados por la iluminación, la cual es desconocida (día soleado, nublado, etc.) e incontrolable. Ésta puede originar sombras y brillos en la carretera y en los objetos de la escena (líneas de carril, vehículos, etc.), lo que en la imagen puede ocasionar la unión aparente entre los mismos,

así como alterar sus características de intensidad, cromaticidad e incluso forma.

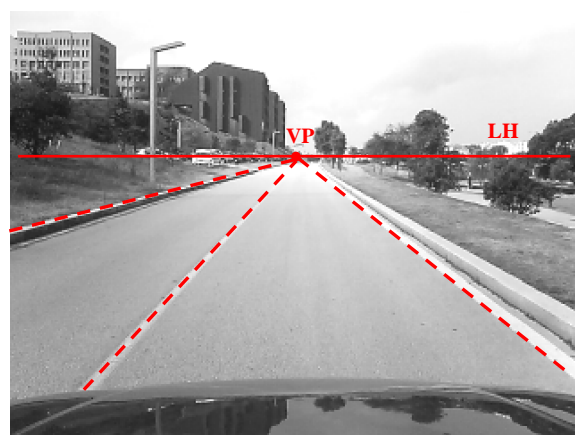
Los métodos de detección de carril basados en visión por computador se dividen generalmente en dos etapas [9]: extracción de las características de la carretera (líneas de carril y límites de la vía) y ajuste de éstas a un modelo. La primera consiste en identificar en la imagen las potenciales líneas de carril y/o bordes de la carretera, lo cual se lleva a cabo generalmente mediante técnicas de detección de bordes [2,4,6,7,12] o métodos basados en el gradiente [1,10]. La segunda etapa, consiste en ajustar las líneas detectadas a un modelo matemático, es decir, determinar la ecuación matemática de las líneas de carril [5,8,13,14]. De este modo, por una lado se verifican los bordes extraídos de la imagen que pertenecen a las líneas de carril o a los límites de la vía, y por el otro, permite conocer la trayectoria de la carretera, haciendo posible el guiado del ego-vehículo.

El presente artículo se centra en la primera etapa, presentando un método para extraer los bordes de la imagen que son potenciales marcas de carril o límites de la vía. Para ello se propone un método para la detección del punto (vía recta) o puntos (vía curva) de fuga de la imagen de carretera. El punto de fuga de una escena de carretera es aquel punto del plano de la imagen donde se cortan todas las líneas situadas sobre el plano de la carretera que en la realidad son paralelas a una dirección dada en el espacio la cual no es paralela al plano de proyección. De este modo, conociendo el punto de fuga de la imagen, es posible determinar todos los bordes de la misma que potencialmente pertenecen a las líneas del carril o a los límites de la vía. La extracción de dichos bordes es una de las fases críticas del proceso de detección del carril y de ella depende el correcto funcionamiento del sistema.

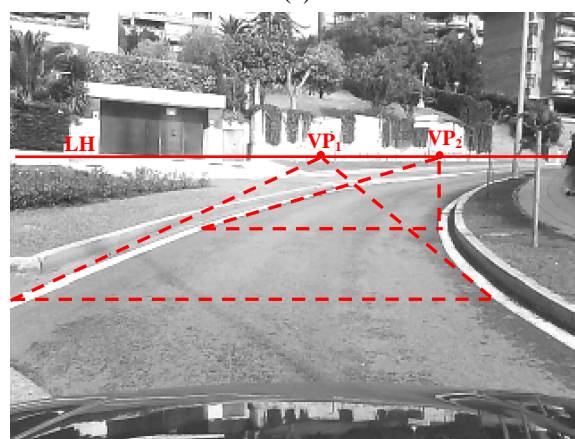
El resto del trabajo está organizado como sigue. En la Sección 2, se describe el método propuesto de detección del punto o de los puntos de fuga de la escena. En la sección 3 se presentan los resultados y finalmente, las conclusiones se muestran en la Sección 4.

2 DETECCIÓN DE LOS PUNTOS DE FUGA DE LA ESCENA.

La perspectiva cónica es el sistema de representación que más se aproxima a la perspectiva de una imagen de carretera típica de los sistemas ADAS. Las líneas que delimitan el carril de una vía son en la realidad líneas paralelas entre sí. Sin embargo, en el plano de la imagen, dichas líneas convergen en un punto en el infinito denominado punto de fuga, VP (ver Figura 1(a)). De la misma manera, el resto de líneas (reales o imaginarias) sobre el plano de la carretera que son



(a)



(b)

Figura 1. Línea de horizonte y punto/s de fuga. (a) Vía recta, y (b) vía curva.

en la realidad paralelas a las líneas del carril, se cortan en el mencionado punto de fuga.

Sin embargo, este hecho solo se produce cuando las líneas del carril son rectas. Para una línea curva no existe un único punto de fuga, sino infinitos, los cuales se sitúan a lo largo de una línea horizontal localizada en el infinito, denominada línea del horizonte, LH (ver Figura 1(a) y 1(b)). La línea del horizonte es el lugar geométrico del espacio en el cual se encuentran todos los puntos de fuga correspondientes a las diferentes direcciones de las rectas situadas sobre el plano de la carretera. Es una recta horizontal sobre el plano de proyección, resultado de la intersección de dicho plano con el plano horizontal que pasa por el punto de vista del sistema proyectivo.

De este modo, cada punto de una línea curva tiene su propio punto de fuga, el cual es resultado de la intersección de la recta tangente a la curva en dicho punto y la línea del horizonte (ver Figura 1(b)). Ahora bien, para una imagen de carretera en la que el carril describe una curva, es muy complejo determinar todos los puntos de fuga de la escena. Sin embargo, si se

consideran pequeños arcos de la curva, éstos se pueden aproximar como rectas, de tal modo que en la imagen se establecen tantos puntos de fuga como tramos de arco hayan sido considerados (ver Figura 2(a) y 2(b)).

El conocimiento de los puntos de fuga es por lo tanto, una información muy valiosa de la escena para la detección del carril. Todos los bordes de la imagen, cuyas proyecciones pasen por el punto de fuga (correspondiente a su tramo) son candidatos a pertenecer a una línea de carril o a una línea límite de la vía, mientras que todos aquellos cuyas proyecciones no pasen por el punto quedan descartadas como tal.

En el presente trabajo, se establecen tres tramos en la carretera, por lo que si la escena es una curva, se tendrán tres puntos de fuga situados sobre la línea de horizonte. En cambio si la carretera es una recta, los tres puntos de fuga coinciden en el infinito. El proceso de detección del punto de fuga correspondiente a cada tramo es idéntico.

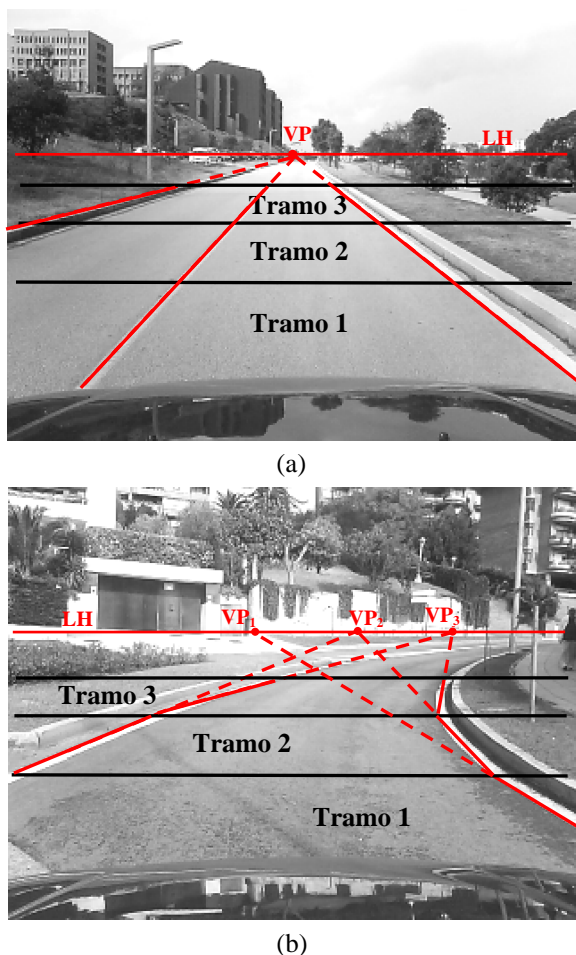


Figura 2. División de la imagen en tres tramos. (a) Vía recta donde el punto de fuga de cada tramo coincide, VP , y (b) vía curva, donde a cada tramo 1, 2 y 3 le corresponde un un punto de fuga, VP_1 , VP_2 y VP_3 , respectivamente.

2.1 REGIÓN DE INTERÉS

Con el fin de simplificar la escena, el sistema se centra en una región de interés (ROI) de la imagen adquirida en escala de grises. La ROI corresponde al área de la carretera frente al ego-vehículo que se encuentra situada por debajo de la línea del horizonte aproximada (ver Figura 3(a) y 3(b)), la cual se establece asumiendo condición de tierra plana. De este modo, se excluyen de la imagen todos aquellos elementos que por su situación en la imagen, se tiene la certeza de que no son líneas de carril o límites de la vía (ver Figura 3(a) y 3(b)). Por otro lado, se establece una región en la imagen entorno a la línea del horizonte aproximada, donde la probabilidad de localizar los puntos de fuga de la escena es muy elevada [11] (salvo en situaciones en las que el ego-vehículo se aproxima a un tramo de la vía con una pendiente hacia arriba muy pronunciada o en un cambio de rasante). Los cambios de rasante son situaciones muy

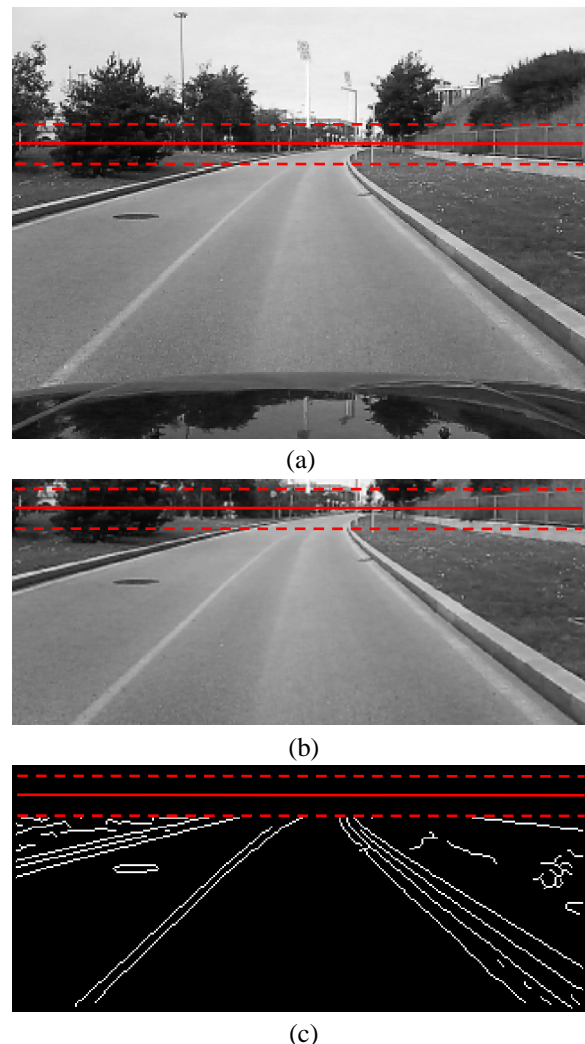


Figura 3. Línea del horizonte aproximada y región de máxima probabilidad de localización de los puntos de fuga, (a) en la imagen adquirida, (b) en la región de interés, y (c) en la máscara de bordes M .

complejas para los sistemas de detección de líneas de carril, independientemente de la metodología propuesta para su detección. Esto se debe a que el tramo de la carretera más alejado del ego-vehículo no aparece en la imagen. Por lo que el único modo de la estimación de las líneas es mediante métodos predictivos.

2.2 FLTRADO POR ORIENTACIÓN

Antes de comenzar el proceso de detección de los puntos de fuga, con el fin de reducir ruido de la ROI, se aplica un filtro paso bajo con una máscara 3x3. Posteriormente, el mapa de bordes M es extraído aplicando el operador Canny [3] (ver Figura 3(c)). En la máscara M aparecen todos los bordes de la imagen independientemente de si pertenecen a las marcas viales, a los bordillos o a cualquier otro elemento de la escena. Sin embargo, para la detección de aquellos que corresponden a las líneas de carril o límites de la vía se dispone de cierto conocimiento previo de la escena.

Debido a la perspectiva, la orientación de las líneas de carril y límites de la vía no es, a priori, completamente desconocida. Aún con el ego-vehículo incorrectamente alineado en la carretera o circulando por una curva, los puntos de fuga de la imagen, por lo general, se localizan horizontalmente en la región central de la línea del horizonte. Esto hace que la orientación, θ de dichas líneas se mantenga dentro de un rango de ángulos en función de la posición que ocupe en la imagen (ver Figura 4). Así, si suponemos el punto de fuga en el centro exacto de la línea del horizonte, la orientación, θ de la línea izquierda del carril podrá variar únicamente entre los valores de 0 y 90°, mientras que la orientación de la línea derecha estará comprendida entre 90 y 180° (ver Figura 4). Sin embargo, el punto de fuga no tienen por que estar en el centro exacto de la línea del horizonte sino que puede estar desplazados. Este es el caso en el que el ego-vehículo está o bien levemente desalineado de la vía, o bien circulando en una curva.

No obstante, esta información es muy útil para descartar elementos de la escena que por su orientación,

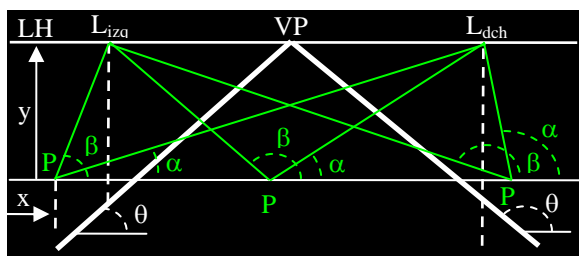


Figura 4. Orientación, θ de cada punto perteneciente a una línea de carril o límite de vía en función de su localización en la imagen.

claramente no corresponden con las líneas del carril o con los límites de la vía. De este modo, se propone un filtrado por orientación de cada punto perteneciente a cada elemento presente en la máscara de bordes.

En primer lugar, se establecen dos límites, izquierdo, L_{izq} y derecho, L_{dch} (ver Figura 4) sobre la línea del horizonte aproximada, entre los cuales la probabilidad de encontrar situados los puntos de fuga de la escena es muy elevada, incluso si el ego-vehículo transita por una curva cerrada. De este modo, cualquier punto perteneciente a un borde de la imagen cuya orientación presente un valor fuera del intervalo $[\alpha, \beta]$, será descartado como punto del borde perteneciente a una línea de carril o límite de vía. Para cada punto de borde (x, y) de la máscara, M tenemos que,

$$M(x, y) = \begin{cases} 1, & \alpha(x, y) \leq \theta(x, y) \leq \beta(x, y) \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

donde,

- si $x < L_{izq}$,

$$\alpha = \frac{360}{2 \cdot \pi} \cdot \text{atan} \frac{y}{L_{izq} - x} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{360}{2 \cdot \pi} \cdot \text{atan} \frac{y}{L_{dch} - x} \quad (3)$$

- si $L_{izq} \leq x \leq L_{dch}$

$$\alpha = \frac{360}{2 \cdot \pi} \cdot \text{atan} \frac{y}{x - L_{izq}} \quad (4)$$

$$\beta = 180 - \frac{360}{2 \cdot \pi} \cdot \text{atan} \frac{y}{x - L_{dch}} \quad (5)$$

- si $L_{dch} < x$

$$\alpha = 180 - \frac{360}{2 \cdot \pi} \cdot \text{atan} \frac{y}{x - L_{izq}} \quad (6)$$

$$\beta = 180 - \frac{360}{2 \cdot \pi} \cdot \text{atan} \frac{y}{x - L_{dch}} \quad (7)$$

y donde el ángulo de orientación, θ de cada punto de borde se obtiene a partir de sus gradientes horizontal y vertical de intensidad,

$$\theta = \frac{360}{2 \cdot \pi} \cdot \text{atan} \frac{dx}{dy} \quad (8)$$

donde,

$$dx = I(i+1, j-1) + I(i+1, j) + I(i+1, j+1) - (I(i-1, j-1) + I(i-1, j) + I(i-1, j+1)) \quad (9)$$

$$dy = I(i-1, j-1) + I(i, j-1) + I(i+1, j-1) - (I(i-1, j+1) + I(i, j+1) + I(i+1, j+1)) \quad (10)$$

y donde I es la región de interés en escala de grises. Así, en la máscara de bordes permanecen aquellos puntos cuya orientación satisface la condición de

orientación (ver Figura 5(a)). Posteriormente, se lleva a cabo un agrupamiento de píxeles por cercanía, con el fin de unir aquellos bordes correspondientes a líneas de carril o límites de vía que inevitablemente hayan perdido algún punto en el filtrado (ver Figura 5(b)), tras lo cual se realiza un filtrado por tamaño de los elementos de M (ver Figura 5(c)).

2.3 DETECCIÓN DE LOS PUNTOS DE FUGA

Una vez descartados aquellos bordes de la máscara, M que por su orientación es improbable que pertenezcan a líneas de carril o límites de la vía, el siguiente paso del proceso es el cálculo de los puntos de fuga de la escena a partir de los segmentos remanentes en M .

En primer lugar se establecen tres regiones en la ROI (ver Figura 5(c) y Figura 6(a), 6(b) y 6(c)), a cada cual le corresponde un punto de fuga. Los tramos establecidos son de distintas dimensiones. El *Tramo 1*, el cual es el más cercano al ego-vehículo, es considerado de mayor tamaño porque aún circulando en una curva, las líneas del carril son prácticamente

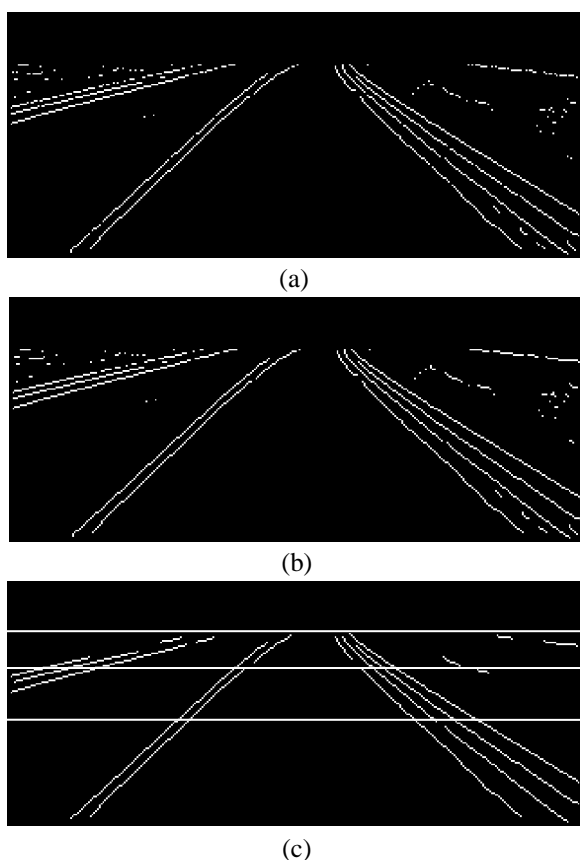


Figura 5. Máscara de bordes M de la Figura 3(c), (a) tras el filtrado por orientación, (b) tras el agrupamiento de píxeles, y (c) tras el filtrado por tamaño y establecimiento de los tramos.

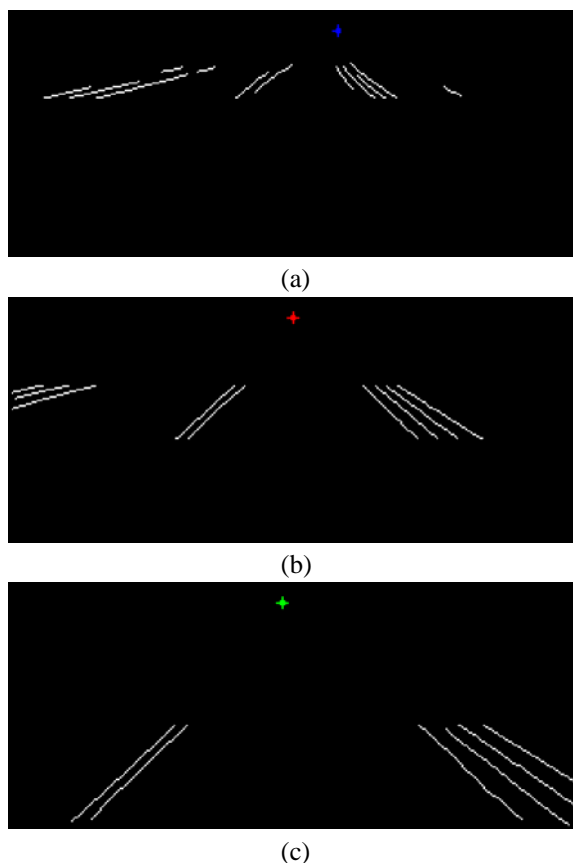


Figura 6. Puntos de fuga obtenidos para cada tramo, (a) Tramo 3, (b) Tramo 2, y (c) Tramo 1.

rectas en la imagen debido al efecto de la perspectiva (ver Figura 2(b)). Los *Tramos 2* y *3*, son menores porque a distancias más alejadas la curvatura de las líneas es apreciable. El tamaño de los tres tramos es establecido en base al conocimiento previo de la escena, incluyendo la altura y ángulo tilt de la cámara situada en el ego-vehículo, así como asumiendo condición de tierra plana. En este trabajo el Tramo 1 es una región de la imagen de 320x60 mientras que el Tramo 2 y el Tramo 3 son de 320x30 y 320x20, respectivamente.

La detección del punto de fuga de cada tramo se lleva a cabo mediante un proceso iterativo por votación. Para ello, se calculan todos los puntos de intersección entre todos los segmentos de línea remanentes en el tramo y se calcula el centro geométrico de dichos puntos. A partir de dicho centro geométrico de los puntos de intersección se establece un margen de distancia, T , de modo que todos los segmentos de la máscara cuya proyección pase a una distancia superior a T son descartados como bordes correspondientes a líneas de carril o límites de vía. Con la nueva máscara M , el proceso se repite sucesivamente hasta que se obtiene una máscara de bordes final que no presente ningún segmento descartado, situación en la cual, el centro geométrico de intersección de la última

iteración es considerado finalmente como el punto de fuga del tramo bajo análisis (ver Figura 6(a), 6(b) y 6(c)).

La ecuación de cada segmento se calcula mediante su pendiente, m y las coordenadas de su centroide, $P_c(x_c, y_c)$, obtenidos sendos parámetros partir de los puntos extremos del segmento $P_i(x_i, y_i)$ y $P_f(x_f, y_f)$,

$$m = \tan \frac{y_f - y_i}{x_f - x_i} \quad (11)$$

$$P_c(x_c, y_c) = P_c \left(\frac{x_f - x_i}{2}, \frac{y_f - y_i}{2} \right) \quad (12)$$

Para calcular los puntos de intersección en cada iteración, a cada punto obtenido se le asigna un peso determinado en función de las longitudes y de las orientaciones de los segmentos empleados para su cálculo.

La longitud de los segmentos es un factor importante. Cuanto más largos son los segmentos, mayor precisión se tiene a la hora de determinar sus ecuaciones y por lo tanto la precisión en la obtención del punto de fuga será mayor.

Por otro lado, la precisión del punto de fuga es mayor cuanto más difiere la pendiente de las rectas que interseccionan. Así, por ejemplo, el punto de intersección entre una de las rectas correspondientes al carril izquierdo y una de las rectas correspondientes al carril derecho, estará más próximo al punto de fuga real que el punto de intersección de dos rectas correspondientes a uno de los dos lados de la escena, cuyas pendientes son más parecidas. De este modo, si la pendiente de una de las rectas satisface que $0 < \theta < 90$ y la otra $90 < \theta < 180$, el peso asignado al punto de intersección obtenido es mayor que si las pendientes de las dos rectas cumplen $0 < \theta < 90$ o $90 < \theta < 180$.

Una vez finalizado el proceso, los bordes remanentes en la máscara M , son los finalmente clasificados como potenciales bordes correspondientes a líneas de carril o límites de la vía (ver Figura 6(a), 6(b), 6(c)), 7(a), 7(b) y 7(c)).

4 RESULTADOS

El sistema fue instalado en un vehículo preparado al efecto y fue probado en tráfico urbano real en Santander, Cantabria. La videocámara empleada fue una Trust Widescreen HD WebCam, 8 bit pixel, auto balance de blancos y tiempo de exposición automático, la cual proporcionó imágenes a color con una resolución de 240x320. Las imágenes fueron adquiri-

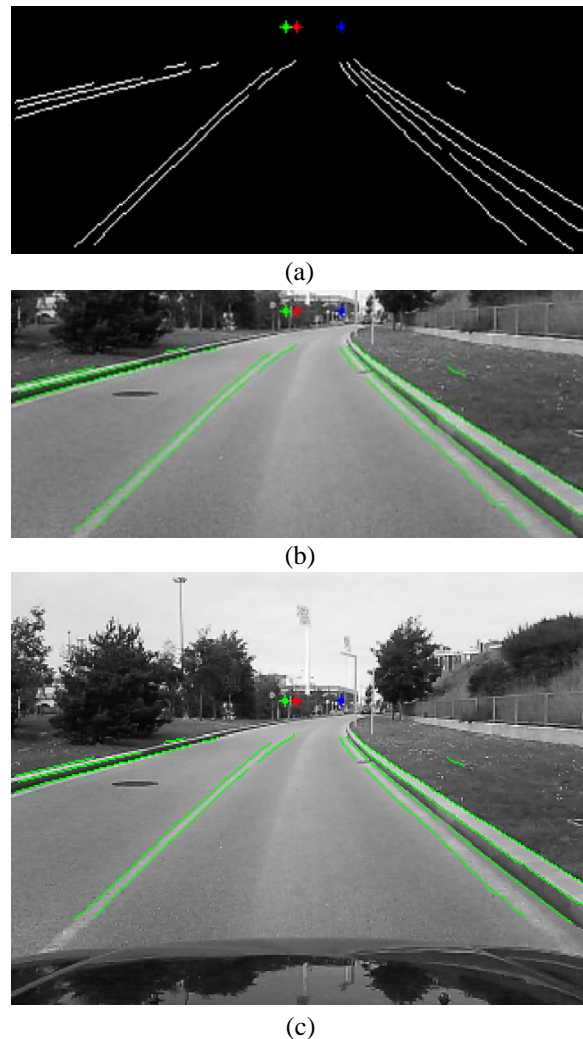


Figura 7. Puntos de fuga en: (a) la máscara de bordes potencialmente correspondientes a líneas del carril o límites de la vía, (b) la ROI, y (c) en la imagen inicial adquirida.

das y procesadas en Matlab® sobre un ordenador portátil standard.

Un total de 6.600 imágenes de la carretera, en 22 video secuencias de 300 imágenes cada una, fueron adquiridas y almacenadas en diferentes condiciones atmosféricas. La Figura 8 muestra el resultado del algoritmo de detección de los puntos de fuga y bordes correspondientes a potenciales líneas de carril y límites de vía, los cuales se muestran sobreimpresionados en color verde en la imagen original. El método se comprobó en todas las imágenes.

Como se aprecia, la mayor parte de los bordes generados por las líneas de carril así como por los límites de vía son correctamente detectados por el método como potenciales bordes de dichos elementos. Sin embargo, también se aprecia que algunos de los bordes aparecen incompletos. Esto se debe principal-



Figura 8. Ejemplos de la estimación de los puntos de fuga en diferentes tipos de vía urbana y diferentes condiciones de iluminación. En la imagen superior de cada ejemplo se muestra la imagen original con los potenciales bordes de carril y límites de vía sobreimpresionados en verde, mientras que en la imagen inferior se muestran dichos bordes en la ROI. En ambas imágenes se muestran los puntos de fuga estimados de los tres tramos.

mente al método de agrupamiento de bordes basado en la cercanía, el cual presenta dificultades en la unión de tramos de bordes demasiado separados. Con el fin de evaluar el comportamiento cuantitativo, se determinaron manualmente los bordes correspondientes a las líneas de carril y a los límites de la carretera de un conjunto de diez imágenes de la colección. Estos bordes fueron obtenidos a partir de la máscara de bordes, M determinada mediante el algoritmo de Canny. La evaluación se llevó a cabo comparando dichos bordes con los proporcionados por el método. Los resultados mostraron una tasa de detección de positivos PR igual al 78,76%, obtenida mediante,

$$PR(\%) = \frac{P}{V} \cdot 100, \quad (13)$$

donde V es el número total de píxeles pertenecientes a bordes de línea de carril y límites de vía y P es el número de píxeles de borde de dichos elementos proporcionado por el método propuesto. Como se ha comentado, esta pérdida de píxeles de los bordes se debe principalmente al método de agrupamiento de bordes basado en la cercanía.

Por otro lado, debido a la dificultad de obtener “manualmente” los puntos de fuga reales de las imágenes adquiridas, la comprobación de estos se realizó por observación, sin aportar datos experimentales. Como se aprecia, el método de detección de dichos puntos es bastante fiable y preciso. Esto lo demuestra el hecho de que en la gran mayoría de los casos, los tres puntos de fuga se sitúan a unas alturas muy similares

de la imagen, describiendo la línea del horizonte real de las escenas.

5 CONCLUSIONES

Se ha presentado un método para detección de los puntos de fuga en imágenes de carretera típicas de los sistemas ADAS. El conocimiento de los puntos de fuga de la escena permite detectar los bordes de la imagen que son candidatos a pertenecer a una línea de carril o a un límite de la vía.

El método propuesto presenta un comportamiento eficiente tanto en la detección de los puntos de fuga como en la de los bordes correspondientes a las líneas de carril y a los límites de la vía. Sin embargo se produce una cierta pérdida de píxeles de los bordes de estos elementos, debida al método de agrupamiento por cercanía empleado.

Como trabajo futuro se abordará en primer lugar el desarrollo de un método de agrupamiento de segmentos de bordes que permita un comportamiento más robusto que el actual. En segundo lugar, nos centraremos en el desarrollo de un método para la verificación de los potenciales bordes de las líneas del carril y de los límites de la vía.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado bajo el patrocinio del Ministerio de Economía y Competitividad. (Proyecto: DPI2012-36959).

Referencias

- [1] Bertozzi, M., (1998) GOLD: a parallel real-time stereo vision system for generic obstacle and lane detection, *IEEE Transactions on Image Processing*, (7), pp. 62-81.
- [2] Beucher, S., Bilodeau, M. (1994), "Road segmentation and obstacle detection by a fast watershed transformation", *in: Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symp.*, pp. 296-301.
- [3] Canny, J., (1986) A Computational Approach to Edge Detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, (8), pp. 679-698.
- [4] Dickmanns, E.D., (1997), "Vehicles capable of dynamic vision", *in: International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 1577-1592.
- [5] Dickmans, E.D., Mysliwetz, B.D., (1992) "Recursive 3-D Road and Relative Ego-State Recognition", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, pp. 199-213.
- [6] Kluge, K., Thorpe, C., (1992), "Representation and Recovery of Road Geometry in Yarf", *in: Proc. IEEE Symp. Intelligent Vehicles*, pp. 114-119.
- [7] Kosecks, R., Blasi, C.J., Taylor, J., Malik, J., (1998), "A comparative study of vision-based lateral control strategies for autonomous highway driving", *in: IEEE International Conference on Robotics And Automation*
- [8] Kreucher, C., Lakshmanan, S (1999), "LANA: A Lane Extraction Algorithm that uses Frequency", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol 15, pp. 343-350.
- [9] Martín, D., García, F., Musleh, B., Olmeda, D., Peláez, G., Martín, P., Ponz, A., Rodriguez, C., Al-Ka, A., De la Escalera, A., et al. (2014) IVVI 2.0: An intelligent vehicle based on computational perception, *Expert Systems with Applications* 41(17), pp. 7927-7944.
- [10] Pomerleau, D., (1995), "RALPH: Rapidly adapting lateral position handler", *in: Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symp.*, Detroit, pp. 506-511.
- [11] Suttorp, T y Bücher, T. (2006) "Robust vanishing point estimation for driver assistance", *in: IEEE Proc. Intelligent Transportation Systems Conference*, pp. 1550-1555.
- [12] Thorpe, C., Hebert, M. H., Kanade, T., Shafer, S.A., (1988), "Vision and navigation for Carnegie-Mellon Navlab", *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 10, pp. 506-511.
- [13] Wang, Y., Shen, D., Teoh, E.K., (2000) "Lane Detection Using Spline Model", *Pattern Recognition Letters*, vol. 21, pp. 677-689.
- [14] Yuille, A.L., Coughlan, J.M., (2000), "Fundamental Limits of Bayesian Inference: Order Parameters and Phase Transitions for Road Tracking", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, pp. 160-173.

Oculus-Crawl, a Software Tool for Building Datasets for Computer Vision Tasks

Iván de Paz Centeno, Eduardo Fidalgo Fernández, Enrique Alegre Gutiérrez, Wesam Al Nabki

Dpto. Ingeniería Eléctrica y de Sistemas y Automática,

Universidad de León, Campus de Vegazana s/n, 24071 León, Spain,

ipazc@unileon.es, efidf@unileon.es, ealeg@unileon.es, mnab@unileon.es

Abstract

Building datasets for Computer Vision tasks require a source of a large number of images, like the ones provided by the Internet search engines, joined with automated scraping tools, to construct them in a reasonable time. In this paper it is presented Oculus-Crawl, a tool designed to crawl and scrape images from the search engines Google and Yahoo Images to build datasets of pictures, that is modular, scalable and portable. It is also discussed a benchmark for this crawler and an internal feature for storing and sharing big datasets, that makes it suitable for Computer Vision and Machine Learning tasks. In our tests we were able to crawl and fetch 11.555 images in less than 14 minutes, including also their meta-data description, showing that it might be well-suited for retrieving large datasets.

Key words: crawler, search engine, dataset, images, computer vision.

1 INTRODUCTION

Nowadays there exist a huge number of search engines that allow us to search content on the web including almost any type of resource, ranging from documents and pictures to sounds and videos. The nature of the web is to link multiple resources as hyper-links among them and, following the analogy, the process of reaching an end resource is done by crawling the interconnected nodes. Historically, the search engines have been fed by multiple web crawlers [4, 6, 9] that automatically track and follow the hyper-links from the content of the web, creating a database of entries that are usually formatted into a human-readable view in order to be presented to humans and to be read by humans. This adds an overhead in the automatic retrieval of content from search engines, as most of the times their results require to be analyzed and parsed from a markup language; in addition, the way to navigate through their content is usually handled dynamically by JavaScript code in form of AJAX calls [5], which requires of a sort of human intervention like scrolling down the content

or clicking on certain regions of the view, adding extra layers of complexity to the task of crawling those web sites. Even though most of them are not program-friendly in terms of extracting information, there have existed many successful attempts in retrieving useful information by automatically parsing the results from those search engines, like the framework Scrapy [15], the project icrawler [3] for python, or Apache Nutch [2], which takes advantage of big data tools such as Apache Hadoop [1]. Despite Computer Vision is one of the computer fields that most demand of large numbers of images, commonly required to solve specific classification or detection problems, crawling and scraping tools might be well suited for it. Even though most of the times Computer Vision problems leverage into public datasets, sometimes it exists the need to improve them or create new ones. For those situations where a distributed crawling is required and there is a lack of a distributed infrastructure, we provide an alternative named Oculus-Crawl, a crawler in the form of command line tool for images from the search engines Google and Yahoo, that can follow conveniently a distributed nature [10], which is isolated from underlying Big Data frameworks, and that can be shipped in the form of Docker containers [11]. It does not require to write code and is projected to be used as a source for Computer Vision and Machine Learning datasets.

The paper is structured in 4 sections, being the section 1 dedicated to the introduction; the section 2 is destined to an overview of the architecture of the solution which gives small insights about its main features; the section 3 summarizes the experiments and results we had with the tool applied to different topology configurations and tool options; and the section 4 dedicated to the conclusions and possible future works for this tool.

2 ARCHITECTURE

The tool has three roles out-of-the-box: a factory, a crawler and a client. Each role is performed by its correspondent entry point in the application, and they communicate each other through the factory, which exports an API-REST interface on a

specific port. The generation of a dataset comprises 5 stages:

1. The request to the factory for the generation of a dataset, done by the client.
2. The crawling of images, done by the crawlers.
3. The fetching of crawled images, done by the factory.
4. The packaging of the images into a single zip file with their crawled meta-data, done by the factory.
5. The publication of the dataset into a public directory, done by the factory.

An overview of the stages can be seen in Figure 1.

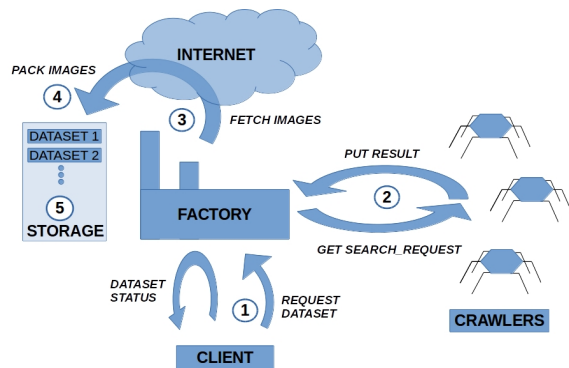


Figure 1: The 5 stages in the generation of a dataset of images.

The factory allows to create requests for generation of datasets within a single HTTP call. Each request for generation of a dataset is formed by a set of search requests for a specific search engine and a search words to be used, among other parameters; a visualization of this scheme can be found in Figure 2.

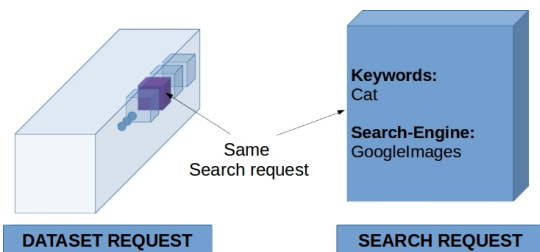


Figure 2: A dataset generation request is an aggregation of search requests. It is handled by the factory and the crawlers.

The crawlers, that might be running on any host, steadily poll the factory for requests of new datasets until one is retrieved, which initiates the

crawling process. This process consists of retrieving search requests from the dataset request, crawling their results and returning them back to the factory. The final scenario is a system on where the available crawlers compete to retrieve search requests and process them until all are processed. Then, they jump to the next available dataset request or stay idle waiting for new ones. This crawler's behavior leads to a scalable distributed system, where increasing the number of crawlers reduces proportionally the overall time for crawling. Note that since the factory is an HTTP API-REST server, it can also be scaled up by load balancing it the same way a web server is usually scaled up.

When a dataset is completely crawled, the factory starts fetching all the crawled items in order to generate the final elements of the dataset, each consisting of the content of the image and its associated meta-data in JSON format. Note that the crawlers only gather the meta-data referenced by the search engine, including the URL to the images; and the factory, once the crawler process is finished, fetches their content.

2.1 THE SEARCH SESSION

The search session is the key feature in Oculus-Crawl as it preserves the whole dataset state in form of a serializable JSON structure that can be saved directly to a file. Therefore, each dataset request will have a search session attached that can be managed remotely, through the factory's API-REST. It can be used to backup a process of dataset creation at any time and to restore this process remotely, from the client side.

The proposed key feature in Oculus-Crawl suits perfectly in the creation of Computer Vision datasets, as once this session is filled up, it can be used as a pre-fetching step on the creation of a dataset, avoiding the need to crawl again. Moreover, the serialization of the session state eases the sharing of the dataset over the network, hence, reduces the bandwidth, since its size is several times smaller than the complete fetched dataset, as shown in Figure 3.

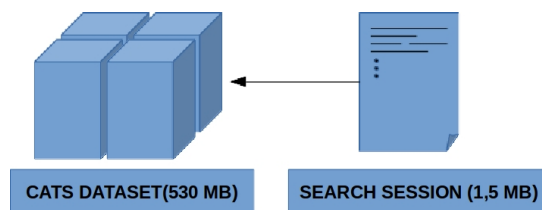


Figure 3: The search session representing an entire dataset. It contains information enough to rebuild the dataset without the need to crawl again.

2.2 THE SEARCH ENGINES

It is a common practice for search engines to associate meta-data to each of the elements they present to the final user. This meta-data might be useful for tagging the resources displayed by a search engine, as it is common to find resources with a descriptive text attached. Oculus-Crawl takes advantage of this behavior, storing the descriptive text with the width, height and file extension in the meta-data file of the final raw dataset. Currently, Google Images and Yahoo Images are officially supported by Oculus-Crawl. During the development phase of the tool, Bing Images was also supported, but a change in their presentation scheme left the search engine currently out of support. It is stated that search engines set limits on the number of elements they display for a single search request, as it is demonstrated that the behavior of most of the users is to look and use only the first entries of the results [16]. This leads the search engines to leave the less accurate elements they display on the least results they show, or to limit the number of results they provide e.g. Google Images is limited to 400 elements. When a search engine is not limited or its limit is too high, like Yahoo Images, the tool establishes a soft limit on approximately 500 results. This soft limit avoids to process an excessive number of pictures from a single Document Object Model (DOM) and also discards the least accurate resources. In Table 1 are shown the limits for each search engine.

Table 1: Search engines limits. Hard limit is imposed by the search engine. Soft limit is imposed by Oculus-Crawl.

Search Engine	Results Limit	Type
Google Images	400	Hard
Yahoo Images	500	Soft

In order to circumvent these limits and at the same time retrieve the most accurate results for a given topic, Oculus-Crawl follows a divide-and-conquer strategy, splitting each search request in multiple search requests, having each slight changes that consist of appending an adjective to the main search words. This task is accomplished by the client role of Oculus-Crawl, which accepts a set of adjectives in addition to the main search words, and automatically combines them, therefore, generating multiple and different search requests that forces the search engines to change the nature and order of the elements displayed for each. Hence, a list of adjectives compatible with the main search words should be manually provided during the invocation of the client.

2.3 USAGE OF ADJECTIVES

The Oculus-Crawl client accepts as input a set of adjectives in order to combine them with the original search words with the goal of increasing the number of pictures retrieved. Each combination leverages into a different set of results but sharing all of them the same inner semantic. A restriction, however, is that the adjectives chosen should be applicable to the search words context, e.g. a chair can be blue, beautiful or small; but can not be angry or thirsty. Even though the search engines always retrieve results regardless of the search keywords used, the results of using incompatible adjectives lead to an unknown or incorrect semantic, where most of the results are probably going to be out of the context of the original search words. This is explained by the fact that search engines associate key words to images, being the origin of these key words in the description that usually users attach next to the images in the HTML documents.

2.3.1 Number of adjectives to use.

The number of adjectives used for crawling affects the number of images retrieved. In order to know how many adjectives are needed to build a certain dataset of N images for a single topic, being L_i the limit for the search engine i , the Eq. (1) approximate it.

$$Adv(N) = \frac{N}{\sum_{i=1}^{|L|} L_i} \quad (1)$$

Even though the number of images should be proportional to the number of adjectives used, the factory implements a deduplication mechanism of images, during the fetching stage, that may decrease the number of total pictures compared to the results retrieved with Eq. (1), the higher the number of adjectives used.

2.4 THE FETCHING STAGE

When the crawling process is finished, the factory fetches all the resources crawled. The fetching stage consists of a pool of 10 workers that downloads distributed the content of each of the crawled resources, which implies that up to 10 images can be downloaded simultaneously. Having increased this value might have forced the DNS servers to resolve too frequently the addresses of the hosts that contains the resources, which could potentially be blocked due to the Request Response Limit (RRL) of certain Domain Name Servers (DNS) [17], which can lead to a temporal

ban from the DNS resolver, hence, stopping the factory from successfully generating the dataset. Nonetheless, this parameter will eventually become configurable. Lastly, when a resource is requested to a host, the Oculus-Crawl factory sets a timeout of 15 seconds for the host to answer this request before it is marked as invalid and discarded from the dataset.

2.4.1 Deduplication of resources.

It is common for multiple search engines to refer to the same resources in certain number of results. This can be split into two different situations: 1) the same resource is hosted by two different hosts; 2) multiple search engines provide a reference to exactly the same host. In both cases, the end resource is the same, but the description used as meta-data might be different. A way to tackle this problem is to hash the resources in order to discard duplicates. In Oculus-Crawl, the hashing is done by using the MD5Hash [14] algorithm for each resource, which allows to retrieve the links and search engines that point to the same resources and storing them along with the meta-data element for each resource. For this reason, Oculus-Crawl might be also useful to catch hosts with duplication of resources. The reasons for choosing MD5Hash instead of a more secure hashing method is: 1) even though a collision of hashes is possible [18], in the case of a hash collision for different resources in high sized datasets, it is probably not going to cause a big trouble for the end dataset; 2) low sized datasets are not prone to present collisions and 3) because in scaled environments where a high sized dataset is required, the speed in hashing takes importance and MD5Hash is one of the fastest and reliable-enough hashing methods. However, it is common to have the same picture duplicated with different dimensions or formats each, a situation that MD5Hash or most of the hashing methods are not able to tackle. In this case, a more complex hash algorithm can be used like the Perceptual Hashing [12], which Oculus-Crawl will include in the future.

2.4.2 Inferring the extension of the pictures

When the crawling process is finished, the factory fetches all the resources crawled. In order to know the extension of the fetched picture, the name of the URL that points to it can not be trusted, as it does not necessarily point to a file-system file, e.g. a URL that apparently refers to an image because ends with ".jpg" might refer to an HTML document or a binary executable file instead. Hence, finding the correct extension requires of checking at the response headers of an HTTP HEAD call

to the remote server that is hosting the picture, and to process the MIME-type header that specifies what kind of resource it is returning. Even though this MIME-type header can not be completely trusted, as not all the web servers return a correct MIME-type header for the resources they send, it is the fastest method for inferring the resource's format in a reliable-enough way. Note that MIME-Type is the most reliable method just after the checking at the resource's content itself, and it is also used by the web browsers to correctly parse the retrieved content for the web pages they render. For this reason, Oculus-crawl follows an extension inferring procedure that, by priority, consists of: 1) retrieve the extension from the MIME-type; 2) use the URL name to inaccurately infer the extension when the first method fails. If none of both methods are able to report a valid picture extension, the file is stored in the dataset without extension.

2.5 TECHNOLOGIES USED

Oculus-Crawl has been built entirely in Python3. The project can be directly executed in any x86_64 architecture by using Docker with the *latest* Docker image for Oculus-Crawl¹, which contains all the dependencies satisfied.

2.5.1 Factory process.

The factory process uses the Python's library *Flask* [7] to expose an API-REST which allows standardized interactions for crawlers and clients with the datasets' sessions. Moreover, this functionality can be easily tested and consumed externally (e.g. using HTTP calls with the UNIX tool *cURL*) or wrapped and interfaced in a web view. This means that the creation of a dataset can be invoked, tracked, backup-ed or dumped at any time without the need to have explicitly a client; however, Oculus-Crawl bundles a specific client for managing these tasks. The factory is a multi-tasked process which uses the Python's library *urllib2* to fetch the crawled resources whenever the crawling stage has finished, distributed among processes by using the Python's library *multiprocess*. It also uses the Python's library *hashlib* to perform MD5Hash on each fetched resource in order to avoid exact duplications of resources. The final zipped dataset is generated by using the library *shutil* from Python.

¹<https://hub.docker.com/r/dkmivan/oculus-crawl/tags/>

2.5.2 Crawler process.

The crawler process takes advantage of the framework *Selenium* and its web-drivers [13] for the web-browser *Firefox*. This framework allows a direct interaction with the elements from the DOM and, at the same time, to perform common user's actions like clicking on buttons, performing scrolls or filling forms on the HTML view. Moreover, this scheme takes advantage of the JavaScript engine from the web-browser since the page gets rendered. This way of crawling through Selenium adds overhead on the processing of the HTML by increasing the load times due to rendering the web-page rather than only parsing the HTML, however this behavior reduces the probability for the crawler of getting detected as a bot. Even though it uses a graphical web-browser instead of direct HTTP calls, it can run in non-graphical environments by using the library *PyVirtualDisplay* to wrap the view in a virtual display. Furthermore, a crawler process can be split in several workers taking advantage of the Python's library *multiprocess*, behaving each as a single crawler instance and increasing the overall speed for crawling the resources within a single host.

2.5.3 Client process.

The client process wraps all the API-REST calls from the factory for the generation and tracking of datasets by using the Python's *requests* library. It is a simple client that generates a dataset request on the factory and steadily polls for its status until it is finished, showing a progress bar for each of the stages in the dataset generation.

3 EXPERIMENTS AND RESULTS

We tested the tool in two dedicated servers Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2630 v3 @ 2.40GHz, one dedicated server Intel(R) Xeon(R) CPU D-1531 @ 2.20GHz and one virtual private server Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2650 0 @ 2.00GHz, each of them connected to different networks of 1 Gbps of connectivity. We followed different topologies, running each Oculus-Crawl role in different machines and also combining all the roles together in a single machine to measure the performance impact. In order to help in the measurements of our tests, we defined a measurement variable that we called *adjective_rate*, which represents the ratio of adjectives per crawler. We realized that, for a small *adjective_rate*, a computer with poor performance running a crawler does not improve significantly the overall performance of the crawling process when added to the crawlers pool, as shown in

the Table 2 for the cases A_1 and B_1 . Nonetheless, the performance increases only on situations where the *adjective_rate* is larger, as shown in the Table 2 for the cases A_2 and B_2 . This fact is explained because the search-requests are retrieved by the crawlers whenever they get freed rather than equally distributed among them; leading faster crawlers to process most of the requests, a situation that is best used in the case of a high number of adjectives.

Table 2: Benchmark of crawling same search words with 3 adjectives. A_i for the case of a single and fast crawler and B_i for the case of sharing the crawling process from the same fast crawler with an extra slow crawler.

Cwls	Adjv	Size	Imgs	Time
A_1	3	465 MB	2118	4m 20s
B_1	3	612 MB	2525	4m 17s
A_2	15	2,4 GB	11342	14m 47s
B_2	15	2,4 GB	11555	13m 40s

A_1 : 1 crawler x 3 workers

B_1 : 1 crawler x 3 workers + 1 slow crawler x 1 worker

A_2 : 3 crawlers x 3 workers

B_2 : 3 crawlers x 3 workers + 1 slow crawler x 1 worker

During the crawling process, Oculus-Crawl mixes the search words with each adjective in order to generate new search requests, which usually results in different images being displayed by the search engine. The number of images retrieved is proportional to the number of adjectives used for generating the dataset; however, as it can be stated in the Figure 4, the number of images is less than expected the more adjectives are used.

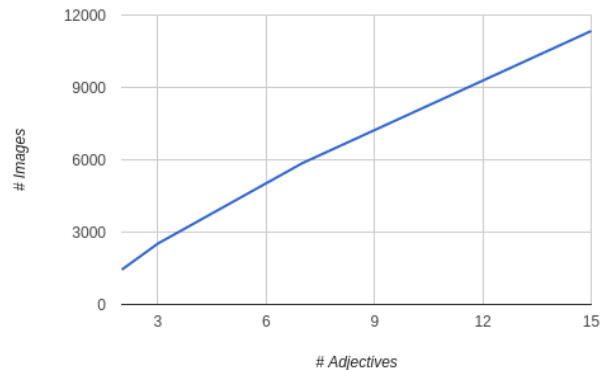


Figure 4: Relation between number of images retrieved and number of adjectives used to crawl.

The reason behind this distribution is that Oculus-Crawl hashes the images by their MD5Hash in order to discard duplicates, and it is more likely to

find more duplications or pictures out of service the more adjectives used for crawling. However, we noticed that when the crawlers were spread among servers located in different countries rather than a single country, the number of images retrieved was higher, as shown in the Table 2 in the case of B_1 and B_2 . This is explained by the fact that some search engines, like Google, displays different results for the same search words based on the geographic localization of the IP that made the request [8], which reduces the probability of duplication of images.

We also measured the time spent by Oculus-Crawl to process 4 adjectives using from 1 single-threaded crawler to 4 single-threaded crawlers spread on 4 different machines and networks, as shown in Figure 5.

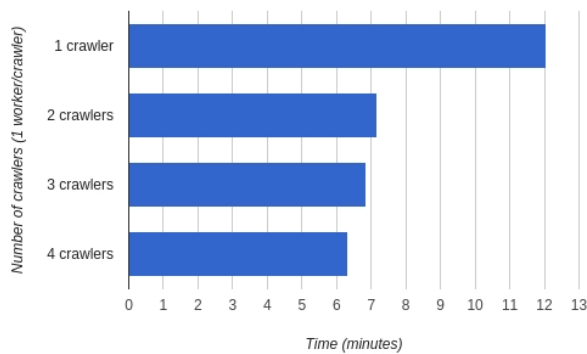


Figure 5: Time benchmark for 4 adjectives in function of the number of crawlers with a single worker each.

The measurement was done by using the UNIX *time* command preceding the invocation of the dataset creation, which gives an exact execution time. The highest increase rate in time performance was achieved by using two crawlers, which passed from 12 minutes to 7. However, the best performance was achieved by using as many crawlers as adjectives. When the crawling process is finished, the factory starts to fetch each resource from the references and finally to compress it in order to be published in a directory, which adds a static time independently of the number of crawlers working in the same pool. This static time depends on: 1) the connection speed of the factory's host and the throughput of the factory's hard disk; 2) the size, availability and connection speed of each crawled resource's host. Under our tests, 4 adjectives leveraged into 3200 images, a total of 800 MB of size and it took 2 minutes and 20 seconds from the start of the fetching stage until the publishing stage.

Finally, we counted the extensions inferred by

Oculus-Crawl by checking the MIME-Type from the response headers and the URL names whenever a MIME-Type was missing, showing that the most used picture extensions belong to the JPEG extension group. In our tests, we realized that there were some files fetched by the factory that were executables, like shown in the Table 3. This implies that search engines for images sometimes might refer to resources that are not images, even though originally they were images, showing that a preprocessing of the files to ensure that they are images is desirable.

Table 3: Extension for images found by crawling 3 adjectives.

Extension	Count	Representation
.jpg	3190	93,91%
.png	117	3,44%
.gif	81	2,38%
.jpeg	4	0,12%
.html	2	0,06%
.jpg c200	1	0,03%
.bin	1	0,03%
.exe	1	0,03%

4 CONCLUSIONS AND FUTURE WORKS

We developed and presented Oculus-Crawl, an stand-alone alternative for existing crawling tools that serves for building Computer Vision datasets by crawling images from Google and Yahoo images. It was discussed its suitability for building large datasets due to its modular and scalable architecture and its capacity to circumvent the search engines limits by combining adjectives with search words. Within our tests, we were able to crawl and fetch 11.555 images in less than 14 minutes. We concluded that the best results are achieved by distributing crawlers' workers among different countries, which leads to a different set of pictures being displayed for the same search words reducing the probability of duplications and increasing the quality and richness of the final dataset; also, the usage of as many crawlers as adjectives gives the best performance. We provided a relation between number of adjectives and number of images retrieved for a single search-word topic and a function to know an approximation of how many adjectives should be used to retrieve a specific number of images for a given topic. We also discussed about one benchmark for performance in function of the number of crawlers used and another benchmark for the impact of different speeds in multiple crawlers. In addition, we found a practice on certain hostings of swapping an original

indexed image with an executable, thus a check of image correctness before fully using the scraped dataset is advisable. During our tests we used high-end machines that vastly satisfied the needs of the tool; a much lesser specifications might be capable of achieving the same results.

The creation of a dataset of images is the first step in building a working model for Computer Vision and Machine Learning, but in some cases it is required to label each of the elements that compose the dataset; for this reason it might be useful to combine the results of this tool with some logic able to take advantage of the extracted meta-data for each element in order to infer a correct label for each resource.

Also, future directions point towards retrieving other kind of resources like sounds, music, documents and videos; and to increase the number of supported search engines. Even though this software is non graphical, it might be able to be interfaced as a web page. In addition, another way of improving this tool is to automate the generation of adjectives that are semantically valid with the main search words, e.g. by using Natural Language Processing (NLP) techniques based on the language that the main search words belong to.

Lastly, we propose a session scheme, which is a way to share datasets based on crawling, that contains references instead of the whole crafted dataset's content. This tool is able to use this session scheme to rebuild the same dataset in any other computer, easing the sharing process of a crawled dataset.

4.1 HOW TO CONTRIBUTE

This project is released as open-source under the GNU GPL v3 License. It can be located in a git repository within GitHub². Any contribution can be done by making pull requests to the repository or filling the issues tracker.

Acknowledgements

This research was funded by the framework agreement between the University of León and INCIBE (Spanish National Cybersecurity Institute) under addendum 22.

References

- [1] Apache Software Foundation. Hadoop. Version 2.8.0. Mar. 22, 2017. URL: <https://hadoop.apache.org>.
- [2] Apache Software Foundation. Nutch. Version 1.13.0. Apr. 22, 2017. URL: <http://nutch.apache.org>.
- [3] Chen, K. Python icrawler. Version 0.3.6. May. 8, 2017. URL: <https://github.com/hellok/icrawler>.
- [4] Desai Student, K., Devulapalli Student, V., Agrawal Asst, S., Kathiria Asst, P., and Patel Professor, A., (2017). Web Crawler : Review of Different Types of Web Crawler, Its Issues, Applications and Research Opportunities. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 8(3).
- [5] Duda, C., Frey, G., Kossmann, D., Matter, R., and Zhou, C. (2009). AJAX crawl: Making AJAX applications searchable. In *Proceedings - International Conference on Data Engineering*, pages 78–89.
- [6] El-Ramly, N., Harb, H., Amin, M., and Tolba, A., (2004). More effective, efficient, and scalable web crawler system architecture. *International Conference on Electrical, Electronic and Computer Engineering, 2004. ICEEC '04.*, pages 120–123.
- [7] Grinberg, M., (2014). *Flask Web Development: Developing Web Applications with Python*. O'Reilly Media, Inc., 1st edition.
- [8] Gupta, V., Gomes, B., Lamping, J., McGrath, M., Singhal, A., and Tong, S., (2008). System and method for providing preferred country biasing of search results. US Patent 7,451,130.
- [9] Hafri, Y. and Djeraba, C., (2004). High performance crawling system. *Proceedings of the 6th ACM SIGMM International Workshop on Multimedia Information Retrieval*, pages 299–306.
- [10] Kausar, M. A., Dhaka, V. S., and Singh, S. K., (2013). Web Crawler: A Review. *International Journal of Computer Applications*, 63(2):975–8887.
- [11] Merkel, D., (2014). Docker: lightweight linux containers for consistent development and deployment. *Linux Journal*, 2014(239):2.
- [12] Niu, X.-m. and Jiao, Y.-h., (2008). An overview of perceptual hashing. *Acta Electronica Sinica*, 36(7):1405–1411.
- [13] Razak, R. A. and Fahrurazi, F. R. (2011). Agile testing with selenium. In *Software Engineering (MySEC), 2011 5th Malaysian Conference in*, pages 217–219. IEEE.
- [14] Rivest, R., (1992). The md5 message-digest algorithm. *IETF Network Working Group, RFC 1321*.

²<https://github.com/ipazc/oculus-crawl>

- [15] Scrapy, A., (2016). Fast and powerful scraping and web crawling framework. *Scrapy. org. Np.*
- [16] Silverstein, C., Marais, H., Henzinger, M., and Moricz, M., (1999). Analysis of a very large web search engine query log. *ACM SIGIR Forum*, 33(1):6–12.
- [17] Vixie, P., (2014). Rate-limiting state. *Communications of the ACM: ACM Queue*, 12(2):10.
- [18] Wang, X., Feng, D., Lai, X., and Yu, H., (2004). Collisions for hash functions md4, md5, haval-128 and ripemd. *IACR Cryptology ePrint Archive*, 2004:199.

Clasificación automática de obstáculos empleando escáner láser y visión por computador

Aurelio Ponz. Intelligent Systems Lab, Universidad Carlos III de Madrid, aurelio.ponz@uc3m.es

Fernando Garcia. Intelligent Systems Lab, Universidad Carlos III de Madrid, fegarcia@ing.uc3m.es

David Martin. Intelligent Systems Lab, Universidad Carlos III de Madrid, dmgoomez@ing.uc3m.es

Arturo de la Escalera. Intelligent Systems Lab, Universidad Carlos III de Madrid, escalera@ing.uc3m.es

Jose Maria Armingol. Intelligent Systems Lab, Universidad Carlos III de Madrid, armingol@ing.uc3m.es

Resumen

Muchos sistemas enmarcados en el estado del arte del campo de los Sistemas Avanzados de Asistencia a la Conducción (ADAS) y de la conducción autónoma emplean fusión sensorial con el fin de conseguir detección y clasificación de obstáculos fiable en cualquier condición meteorológica y de iluminación. La fusión entre escáner láser y cámara se usa habitualmente en aplicaciones ADAS para mitigar las limitaciones inherentes a cada uno de los sensores empleados. En el sistema presentado se emplean algunas técnicas novedosas para alineamiento de datos y se aplican técnicas de Inteligencia Artificial (IA) en el tratamiento de las nubes de puntos para mejorar la fiabilidad de la clasificación de obstáculos. En este documento se presentan nuevos enfoques para la obtención de clusters en nubes de puntos dispersas, maximizando la información obtenida desde escáneres láser de baja resolución. Tras la mejora de la detección de clusters, se emplean técnicas de IA para clasificar el obstáculo no solo empleando visión por computador, sino también con información del láser. La fusión de la información obtenida desde ambos sensores, con la adición de la capacidad de clasificación del láser, mejoran la fiabilidad del sistema.

Palabras clave: Visión por computador, LIDAR, Sistemas avanzados de asistencia a la conducción, Fusión sensorial.

1. INTRODUCCIÓN

Los accidentes de tráfico se encuentran entre los riesgos evitables más importantes para la vida humana. Alrededor de 1,2 millones de personas mueren, y otros 50 millones sufren secuelas cada año como consecuencia de accidentes de tráfico. Los sistemas ADAS pueden reducir la cantidad y la gravedad de los accidentes de tráfico mediante el uso de tecnologías de visión por computador (VC) e IA. Los ADAS emplean comúnmente escáneres láser y cámaras para detectar y clasificar obstáculos en la vía. Los sensores presentados son complementarios, ya que la capacidad del láser para

detectar obstáculos independientemente de la calidad de la iluminación y de seleccionar Regiones de Interés (ROI) en la imagen en la que se clasificará mediante VC, mejora de forma importante la velocidad y la precisión en esta fase del proceso.

El presente trabajo ha sido desarrollado usando la plataforma de investigación Intelligent Vehicle based on Visual Information 2.0 (IVVI 2.0) del Laboratorio de Sistemas Inteligentes (LSI) de la Universidad Carlos III de Madrid. Esta plataforma está detallada en profundidad en [11] y se puede ver en la figura 1.

El artículo está dividido en las siguientes secciones: La sección 2 presenta el estado del arte en el contexto científico relacionado. La sección 3 muestra una descripción general del sistema. La sección 4 describe el método de obtención de clusters en las nubes de puntos (PC), como parte inicial del proceso de detección de obstáculos. La sección 5 presenta el proceso de alineamiento de datos, esencial para la correcta conversión entre coordenadas de los sistemas de referencia del láser y de la cámara. La sección 6 muestra la estrategia para la clasificación de los obstáculos detectados con las nubes de puntos e imágenes asociadas, empleando Support Vector Machines (SVM). La sección 7 presenta los resultados obtenidos, y, para concluir, la sección 8 muestra las conclusiones obtenidas del presente trabajo.

2. ESTADO DEL ARTE

El trabajo descrito en el presente artículo abarca diversos campos con interesantes estados del arte. En cuanto al proceso de alineamiento automático y desatendido de datos en el sistema presentado, [8] propone un método de calibración empleando un patrón de tablero de ajedrez; [14] propone la calibración automática entre cámara y láser basándose en la reconstrucción mediante la nube de puntos de la superficie de la carretera. Otras aproximaciones como [8] y [7] proyectan las características en un plano 2D para minimizar las distancias entre las características en los diferentes sensores. [10] Presenta un sistema de calibración basado en un modelo CAD para conversión entre

sensores. Una aproximación similar, basada en un modelo triangular, es presentada en [1], mientras que en [3] se emplea un modelo circular.

Una vez que los diferentes sistemas han sido alineados, el siguiente paso es la detección y clasificación de los obstáculos presentes en la escena. Los sistemas de fusión sensorial pueden ser divididos en esquemas centralizados y descentralizados. Los primeros obtienen una única detección basándose en la información obtenida de los diferentes sensores. Algunos ejemplos de esquema descentralizado se pueden encontrar en [12] y [13] con diferentes algoritmos para combinar las características de la VC y del escáner láser, como Naive Bayes, GMMC, NN, FLDA. Los sistemas descentralizados implementan la detección y la clasificación de forma independiente para cada sensor, y una fase posterior de fusión combina las detecciones de acuerdo con el grado de certeza asignado a cada sensor. Otros trabajos defienden la fusión a alto nivel basándose en características multidimensionales para el escáner láser y en Histograma de Gradientes Orientados (HOG) para VC. El trabajo [5] ofrece detección de peatones basada en un modelo de las piernas del peatón para el láser, y en características HOG para VC, buscando la detección distribuida de peatones y la evaluación del peligro. El mismo autor hace uso de técnicas avanzadas de fusión (Joint Probabilistic Data Association Filter) para mejorar la detección de peatones descentralizada empleando láser y VC.



(a) Plataforma de investigación IVVI 2.0



(b) Láser Sick LD-MRS (c) Cámara trinocular XB3

Figura 1: Sensores de la plataforma de investigación IVVI 2.0

3. DESCRIPCIÓN GENERAL

El presente trabajo emplea fusión sensorial entre escáner láser y VC para la detección y clasificación de obstáculos en aplicaciones de automoción.

Este trabajo está incluido en el proyecto IVVI 2.0 (ver figura 1). IVVI 2.0 es la segunda plataforma para investigación y desarrollo del Laboratorio de Sistemas Inteligentes, de la Universidad Carlos III de Madrid.

En la presente aplicación se ha empleado un sensor láser SICK LD-MRS de 4 planos y una cámara trinocular PoinGrey Bumblebee XB3. El láser efectúa una detección inicial de obstáculos y otra fase posterior de clasificación, mientras que la capacidad estereoscópica de la cámara se usa para representar la nube de puntos del plano de la carretera y poder con ello estimar los parámetros extrínsecos entre los sensores. Posteriormente, la cámara es empleada para capturar la imagen y posteriormente tratarla mediante VC.

El láser genera una nube de puntos de la que el sistema extrae los obstáculos en forma de agrupamientos de puntos, llamados clusters. Estos clusters son usados tanto para obtener la ROI en la imagen como para efectuar la clasificación del obstáculo. La ROI extraída de la imagen es procesada para clasificar el obstáculo representado en ella, empleando técnicas de IA aplicadas a la VC. El último paso del proceso fusiona la información de cámara y láser para llevar a cabo la clasificación final del obstáculo basándose en técnicas de Aprendizaje Automático (ML). Para el entrenamiento y puesta a punto de los clasificadores SVM para imágenes y para PC se ha empleado una base de datos de obstáculos etiquetados como imágenes y como nubes de puntos.

4. EXTRACCIÓN DE CLUSTER DE LA NUBE DE PUNTOS PARA DETECCIÓN MEDIANTE LÁSER

El primer paso en el sistema propuesto es la detección de obstáculos empleando nubes de puntos obtenidas del láser. Al no verse afectado por las condiciones de iluminación, se trata del sensor más fiable en nuestro sistema. El sensor láser de cuatro planos proporciona una nube de puntos que representa la escena situada frente al vehículo. Los obstáculos son parte de esta escena, y pueden ser localizados como concentraciones locales de puntos en la nube, que pueden ser categorizados matemáticamente como clusters.

Con el objetivo de obtener de la nube de puntos la

mayor cantidad posible de información posible, se han estudiado diversas técnicas de extracción de clusters. Es importante remarcar que, debido a limitaciones propias del sensor, los obstáculos a detectar estarán representados por una pequeña cantidad de puntos de la nube, habitualmente desde cuatro puntos hasta no muchos más de cincuenta, dependiendo de la distancia desde el sensor hasta el obstáculo. La mayor parte de las estrategias de extracción de clusters disponibles han sido diseñadas para nubes de puntos muy pobladas, habitualmente obtenidas desde escáneres láser multi-capas de alta resolución, o cámaras estéreo, y no se adaptan bien a las nubes de puntos obtenidas en nuestro sistema, obtenidas en exteriores, dispersas y que ofrecen información muy limitada.

El láser SICK LD-MRS ofrece diferentes frecuencias de escaneo con diversas resoluciones angulares. La frecuencia menor, de 12,5 Hz, permite una resolución angular de 0,125° en el frente del vehículo, 0,25° entre los 10° y los 30°, y 0,5° entre los 30° y los 50° (60° si se trata del lado derecho de la escena), como se ilustra en la figura 2. Esta configuración incrementa la capacidad de detección enfrente del vehículo, donde los obstáculos tienden a estar situados a mayor distancia. Para aplicaciones de automoción, resoluciones menores en los laterales de la escena son aceptables, ya que los obstáculos de interés suelen estar situados más cerca que en el frontal, y serán representados por suficientes puntos incluso con resoluciones menores.

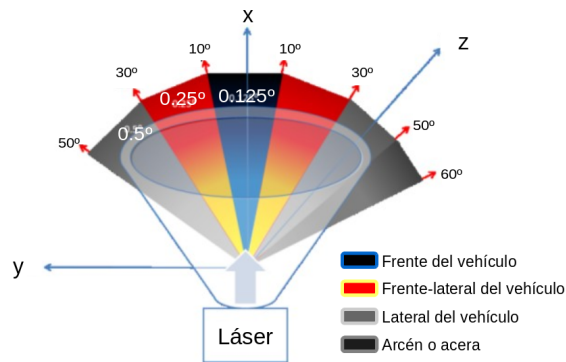


Figura 2: Resolución angular variable en el láser

Las distancias entre los puntos detectados en el cuadro 1 explican la necesidad de diseñar una estrategia de adaptación del umbral de pertenencia a un cluster dependiendo de la distancia entre el obstáculo y el sensor, con el fin de obtener clusters lo más poblados posible. El significado de los valores en el cuadro 1 es el siguiente [15]:

- Y_S es el ancho del punto medido
- Y_{G1} es la distancia entre puntos en un plano

de medición

- Y_{G2} es la distancia entre puntos entre dos pulsos del láser
- X_{layer} es la altura del punto medido

Cuadro 1: Distancias entre puntos medidos con una resolución angular de 0.125 grados

Distancia (m)	Y_S	Y_{G1}	Y_{G2}	X_{layer}
10	0.014	0.029	0.007	0.139
25	0.035	0.074	0.019	0.349
50	0.069	0.148	0.039	0.698
100	0.139	0.296	0.078	1.396

Las siguientes secciones explicarán las diferentes técnicas desarrolladas para obtener una detección automática avanzada de clusters en las nubes de puntos.

4.1. Distancia Euclídea adaptada y clusters geoméricamente condicionados

En el enfoque presentado se ha empleado como criterio para formación de clusters la existencia de una distancia euclídea máxima entre los pares de puntos pertenecientes al cluster, si bien esta distancia será modulada en función de la distancia del sensor hasta el obstáculo, condiciones geométricas, máximo número de puntos permitidos en un cluster, etc.

Adicionalmente, ciertos parámetros del proceso de clustering, como la distancia máxima entre puntos en un cluster, se ven modificados de acuerdo con las formas detectadas en la zona de la nube de puntos cercana al cluster en formación, con el fin de mejorar las detecciones de obstáculos oblicuos. Se ha probado también una estrategia alternativa empleando la distancia de Mahalanobis como criterio de formación de los cluster. Este método tiende a obtener clusters compactos, ignorando los puntos adicionales que representarían obstáculos posicionados oblicuamente. Esta estrategia ha sido descartada puesto que nuestro sistema suministra clusters pequeños, por lo que se requieren estrategias que incrementen la información obtenida.

La aproximación presentada define los clusters como un conjunto de puntos separados entre sí una cierta distancia, variable en función de diversos parámetros, a los que se añaden puntos que no cumplen los requisitos de distancia pero sí ciertas restricciones geométricas respecto al cluster al que se añaden, como por ejemplo pertenecer a la misma recta 3D que algunos de los puntos del cluster.

La estrategia de clustering se define como la adición iterativa de puntos a un cluster ejecutando los siguientes pasos:

El primer punto de la nube es considerado como el primer punto en el cluster.

La distancia euclídea de todos los puntos restantes en la nube con el punto inicial es comparada con el valor *ClusterTh* siguiendo la ecuación 1,

$$\begin{aligned}
 ClusterTh &= BaseTh + DistCorr(x) \\
 DistCorr(x) &= \sqrt{(x * \tan(\alpha_y))^2 + (x * \tan(\alpha_z))^2} \\
 \text{if } |\arctan\left(\frac{y}{x}\right)| &< 2\pi \frac{10}{360} \\
 \text{then } \alpha_y &= 2\pi \frac{0,125}{360} \\
 \text{if } 2\pi \frac{10}{360} &\leq |\arctan\left(\frac{y}{x}\right)| < 2\pi \frac{30}{360} \\
 \text{then } \alpha_y &= 2\pi \frac{0,25}{360} \\
 \text{if } 2\pi \frac{30}{360} &\leq |\arctan\left(\frac{y}{x}\right)| < 2\pi \frac{60}{360} \\
 \text{then } \alpha_y &= 2\pi \frac{0,5}{360}
 \end{aligned} \tag{1}$$

x, y, z son coordenadas de puntos.

Por restricciones del sensor, α_z siempre es 0,8.

donde *BaseTh* es un parámetro cuyo valor ha sido determinado experimentalmente. *DistCorr*(x) es una función de la coordenada x (distancia hasta el obstáculo) que asegura que la distancia euclídea empleada nunca es inferior a la distancia mínima posible entre los puntos del láser a esa distancia, según se ve en la ecuación 1, y dependiendo de las diferentes resoluciones angulares mostradas en la figura 2. *DistCorr*(x) se calcula como la mínima distancia posible entre dos puntos consecutivos en las coordenadas z (eje vertical) e y (eje horizontal perpendicular al sentido de la marcha). α_y Representa el ángulo entre dos lecturas consecutivas del láser en horizontal (eje y), y α_z es el ángulo entre dos lecturas consecutivas del láser en vertical (eje z).

Todos los puntos en la nube se comprueban para su inclusión en el cluster. La misma iteración se lleva a cabo para cada uno de los puntos añadidos al cluster, hasta que todas las combinaciones posibles de comprobaciones han sido agotadas. En ese momento, los puntos cercanos al cluster pero no incluidos en él por no cumplir la restricción de

distancia, se incluyen en una nube temporal junto con el cluster obtenido. En esta nube temporal se ejecuta el algoritmo Random sample consensus (RANSAC) para búsqueda de rectas 3D. Si las rectas obtenidas contienen un determinado número mínimo de puntos pertenecientes al cluster original, y además puntos no pertenecientes al cluster original, asumimos que estos puntos deben ser añadidos al cluster original puesto que representan el mismo obstáculo. Esta técnica se ha mostrado útil en obstáculos oblicuos cuyos puntos se distancian uniformemente entre ellos según aumenta la distancia al sensor.

La figura 3 muestra el resultado del algoritmo. Los puntos rojos y los verdes forman parte del cluster original. Los puntos azules se encuentran cerca del cluster pero no forman parte de él. Las líneas azules son líneas 3D encontradas por RANSAC en el cluster original, y si alguno de los puntos cercanos al cluster pertenece también a las líneas azules, es añadido al cluster extendido, como sucede en este caso con los puntos azules. Tras completar la extracción del cluster, éste es comparado con los parámetros *ClusterTolerance* para la máxima anchura horizontal del cluster en metros, y *maxClusterSize* y *minClusterSize* para el máximo y mínimo número de puntos, respectivamente. Estos parámetros son también función de la distancia hasta el obstáculo.

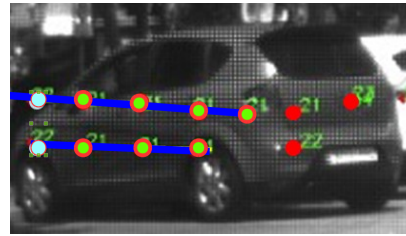


Figura 3: Cluster extendido. Los puntos azules se añaden al cluster porque comparten una línea con puntos del cluster

El objetivo de la estrategia es obtener clusters lo más poblados posible, teniendo en cuenta que se usa un láser multicapa de baja resolución. La distancia umbral de clusterización debe ser adaptada en función de la distancia x al obstáculo, puesto que la distancia mínima entre puntos consecutivos del láser crece con x . Debido a limitaciones de la construcción del láser, la distancia mínima detectada en y y en z en puntos consecutivos sería mayor que el umbral inicial si no se adaptara siguiendo la ecuación 1.

4.2. Detección del suelo y eliminación en la nube de puntos

Como se mostrará en la sección 5, el sistema permite calcular el plano correspondiente a la superficie de la carretera, por lo que es posible eliminar de la nube de puntos aquéllos que pertenezcan a la carretera e ignorarlos de cara al cálculo de los clusters.



Figura 4: Los puntos en el plano de la carretera cumplen las restricciones para ser considerados cluster, pero son descartados

5. Alineamiento de datos

El sistema presentado se basa en fusión sensorial entre diversos sensores, que a su vez se basan en distintos fenómenos físicos. Cada uno de estos sensores poseen su propio sistema de referencia, por lo que se debe calcular los parámetros extrínsecos de conversión entre los sistemas de referencia de los sensores para proceder al alineamiento de los datos.

Aplicando el algoritmo M-estimator-SAMple-Consensus (MSAC) [18], aplicado a la detección de un plano en el espacio, es posible generar un vector $[a, b, c, d]$ que defina el plano más poblado en la nube de puntos, que podemos asumir que coincidirá con el plano de la carretera.

$$\pi_{(x)} : ax_c + by_c + cz_c + d = 0 \quad (2)$$

$$\pi_{(x)} : \vec{n} \cdot \vec{p} = h \quad (3)$$

La ecuación 2 se puede escribir en su forma Hessiana como 3, donde \vec{n} es el vector normal al plano de la carretera, y la relación entre este vector y los ángulos de rotación de cámara y láser se pueden calcular como se muestra en el trabajo [19].

De la ecuación 3 deducimos que el vector \vec{n} es normal al plano $\pi_{(x)}$ encontrado, puesto que la proyección en \vec{n} de cualquier punto localizado en el plano genera siempre una distancia fija. Esta distancia es mínima desde el plano al origen de coordenadas de la nube de puntos, por lo que se trata de la altura h del sensor.

Una vez que todos los parámetros extrínsecos de calibración entre los sensores roll, pitch, yaw y x, y, z han sido calculados, el sistema es capaz de trasladar las coordenadas del láser a coordenadas de la cámara, de forma que se pueden emplear técnicas de VC para clasificar los obstáculos en la imagen.

La conversión entre coordenadas del láser y de la cámara se puede conseguir empleando la ecuación 4

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \left(\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + T \right)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\delta) & 0 & \sin(\delta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\delta) & 0 & \cos(\delta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix}$$

donde T representa el vector de traslación y R la matriz de rotación entre sensores.



Figura 5: Detección de obstáculo basado en cálculo de cluster. Rectángulo azul oscuro es el cluster, rectángulo azul claro es la ROI para VC

6. Clasificación de obstáculos usando fusión sensorial entre láser e imagen

La clasificación de obstáculos se puede obtener en este trabajo empleando fusión sensorial o utilizando uno solo de los sensores. Se ha desarrollado un entorno de desarrollo que permite la comparación directa de resultados y mejoras rápidas en los entrenamientos.

6.1. Clasificación SVM

La clasificación se consigue con la implementación del algoritmo SVM de la librería de VC de OpenCV. El algoritmo SVM fue desarrollado por Vapnik & Cortés [2] y es ampliamente usado en aprendizaje por computador como método de clasificación. En el presente trabajo se ha empleado para efectuar los entrenamientos una base de datos de imágenes etiquetadas manualmente, además de otra base de datos de clusters, obtenidos ambos de una captura ejecutada con la plataforma IVVI 2.0. Tras el proceso de entrenamiento, el clasificador SVM obtenido es almacenado y empleado posteriormente para la clasificación de imágenes y clusters, como se ve en la figura 7.

6.2. Vector de características del láser

Los clusters detectados en la nube de puntos generada por el láser se emplean no solo para determinar una región de interés (ROI) en la imagen, en la que posteriormente se efectúa una clasificación empleando técnicas de IA, sino también se pueden usar para efectuar clasificación de obstáculos sin soporte de imagen [12].

Los clusters se convierten en una estructura mallada empleando la triangulación de Delaunay con el fin de reconstruir la forma del objeto y de extraer características relevantes, como se ve en la figura 6.

Estos obstáculos son detectados por el sistema en forma de clusters, y tienen características apropiadas para efectuar un entrenamiento SVM siguiendo el proceso descrito en la figura 7a. Los clusters obtenidos en las secuencias de prueba son almacenados y etiquetados de acuerdo con las imágenes asociadas de la cámara.

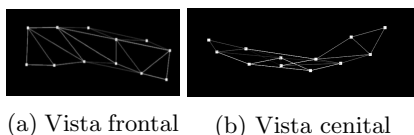
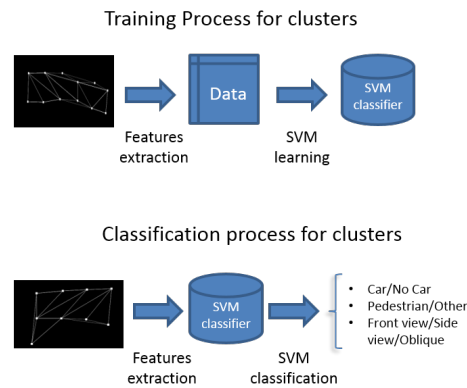
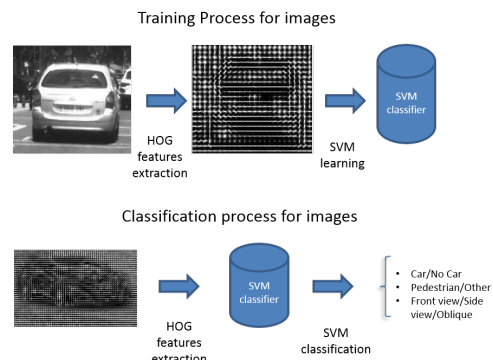


Figura 6: Representación mallada de un cluster. Los triángulos representan la superficie del objeto.

Previos trabajos como [12] consideran nubes de puntos 2D para clasificación, mientras que el presente trabajo extrae las características desde una nube de puntos 3D, en un esfuerzo por maximizar la información disponible. Algunas de las características consideradas para los clusters son la concentración global de los puntos, la concentración de los puntos en cada uno de los planos, la planicidad, la esfericidad, la cubicidad, la triangularidad o la desviación típica de los puntos, todo ello normalizado y calculado respecto al centroide del cluster.



(a) Proceso de aprendizaje SVM para clusters: Entrenamiento y clasificación.



(b) Proceso de aprendizaje SVM para imágenes: Entrenamiento y clasificación.

Figura 7: Proceso de aprendizaje SVM

6.3. Vector de características para visión por computador

Los obstáculos detectados en la nube de puntos del láser se usan para determinar ROIs en las imágenes, susceptibles de ser clasificadas empleando clasificadores SVM. Empleando las ROI detectadas se ha generado una base de datos de imágenes etiquetadas. En un paso posterior, se extraen de las imágenes las características HOG y se efectúa un entrenamiento SVM siguiendo el proceso mostrado en la figura 7b, con el fin de obtener un clasificador SVM [17].

6.4. Fusión de la información

El proceso de fusión sensorial se produce de la forma siguiente: El láser genera una nube de puntos en la que se detectan los obstáculos en forma de clusters. Estos clusters se emplean para una clasificación inicial del obstáculo y para la generación de una ROI en la imagen. Las ROI obtenidas son clasificadas empleando técnicas de IA aplicadas a la VC. En un último paso, la información obtenida de los procesos de clasificación basados en PC y de los basados en imagen son fusionados para obtener una clasificación consolidada.

7. Resultados

Se ha llevado a cabo un estudio de relevancia de las características consideradas para la clasificación SVM de los clusters, usando un conjunto de entrenamiento de 14.000 clusters representando peatones y 8.400 clusters de otros obstáculos. Sólo las características que diferencien nítidamente entre muestras positivas y negativas serán usadas para el entrenamiento. La figura 8 muestra algunas características con buena discriminación entre muestras positivas y negativas.

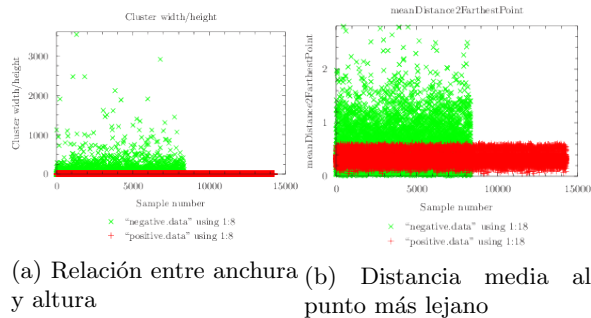


Figura 8: Distribución de los valores de características que diferencian correctamente muestras positivas de negativas

La figura 9 representa las estadísticas para características que no discriminan correctamente entre muestras positivas y negativas. La figura 9a indica que la característica *Densidad del cluster desde vista superior* no discrimina correctamente positivos y negativos, ya que gran parte de los valores coinciden para muestras positivas y negativas.

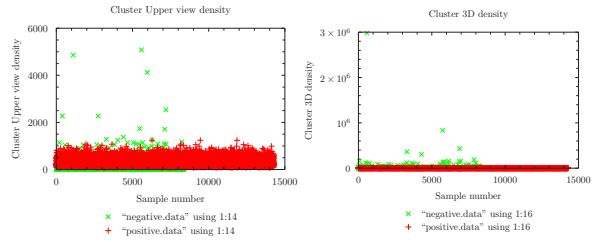


Figura 9: Distribución de los valores de características que no diferencian correctamente muestras positivas de negativas

El uso de fusión sensorial entre láser y cámara permite reducir considerablemente el esfuerzo computacional de clasificación por imagen, al reducir las áreas a clasificar desde toda la extensión de las imágenes a solamente la parte de ellas que presentan un obstáculo, conociendo además el tamaño esperado del mismo. En la figura 10 se compara los Mpixels a clasificar en una sesión de conducción según se emplee o no fusión sensorial.

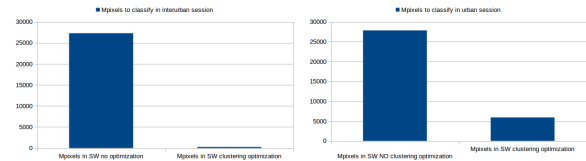


Figura 10: Mejora de prestaciones de la ventana deslizante empleando fusión sensorial

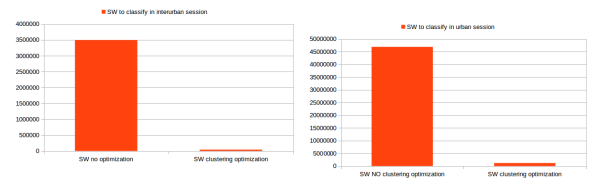


Figura 11: Mejora de prestaciones de la ventana deslizante empleando fusión sensorial

8. Conclusión

El objetivo del presente trabajo es desarrollar un sistema de fusión sensorial para láser y cámara que aproveche las fortalezas de cada uno de los sensores y mitigue sus debilidades. Las estadísticas obtenidas demuestran que se ha obtenido un

sistema fiable y robusto capaz de detectar y clasificar obstáculos tanto aprovechando la fusión sensorial como empleando cada uno de los sensores por separado en caso necesario.

Agradecimientos

El presente trabajo está financiado por el gobierno de España a través de los proyectos CICYT (TRA2013-48314-C3-1-R) y (TRA2011-29454-C03-02).

Referencias

- [1] Debattisti, S, Mazzei, L & Panciroli, M 2013. Automated extrinsic laser and camera intercalibration using triangular targets. *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2013 IEEE, 2013, pp. 696-701.
- [2] Cortes, C & Vapnik, V 1995, Support vector network, *Machine Learning*, vol. 20, pp. 1-25.
- [3] Fremont, V & Bonnifait, P 2008. Extrinsic calibration between a multi-layer lidar and a camera. 2008 IEEE Int. Conf. Multisens. Fusion Integr. Intell. Syst., 2008.
- [4] García, F, Jiménez, F, Naranjo, JE, Zato, JG, Aparicio, F, Armingol, JM & de la Escalera, A. 2012. Environment perception based on LIDAR sensors for real road applications.
- [5] García, F, García, J, Ponz, A, de la Escalera, A & Armingol, JM 2014. Context Aided Pedestrian Detection for Danger Estimation Based on Laser Scanner and Computer Vision. *Expert Systems With Applications*, Vol: 41 (15), pp.6646-6661.
- [6] Kaempchen, N, Buehler, M & Dietmayer, K 2005. Feature-level fusion for free-form object tracking using laser scanner and video. *IEEE Proceedings Intelligent Vehicles Symposium 2005*, pp. 453-458, 2005.
- [7] Kwak, K, Huber, DF, Badino, H & Kanade, T. 2011 .Extrinsic calibration of a single line scanning lidar and a camera. *IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, pp. 3283-3289, 2011.
- [8] Li, Y, Ruichek, Y & Cappelletti, D 2011. 3D triangulation based extrinsic calibration between a stereo vision system and a LIDAR. *14th Int. IEEE Conf. Intell. Transp. Syst.*, pp. 797- 802, 2011.
- [9] Li, Y, Liu, Y, Dong, L, Cai, X 2007. An algorithm for extrinsic parameters calibration of a camera and a laser range finder using line features, *IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*
- [10] Lisca, G, Jeong, PJP & Nedeveschi, S 2010. Automatic one step extrinsic calibration of a multi layer laser scanner relative to a stereo camera. *Intell. Comput. Commun. Process. (ICCP)*, 2010 IEEE Int. Conf., 2010.
- [11] Martín, D, García, F, Musleh, B, Olmeda, D, Marín, P, Ponz, A, Rodríguez, CH, Al-Kaff, A, de la Escalera, A & Armingol, JM 2014. IVVI 2.0: An intelligent vehicle based on computational perception. *Expert Systems with Applications* 41.
- [12] Premebida, C, Ludwig, O & Nunes, U 2009. LIDAR and Vision-Based Pedestrian Detection System. *Journal of Field Robotics*, vol. 26, no. Iv, pp. 696-711, 2009.
- [13] Premebida, C, Ludwig, O, Silva, M & Nunes, U 2010. A Cascade Classifier applied in Pedestrian Detection using Laser and Image-based Features. *Transportation*, pp. 1153-1159, 2010.
- [14] Rodríguez-Garavito, CH, Ponz, A, García, F, Martín, D, de la Escalera, A & Armingol, JM 2014. Automatic Laser And Camera Extrinsic Calibration for Data Fusion Using Road Plane.
- [15] SICK, 2009. LD-MRS manual. SICK AG Waldkirch, Reute, Germany.
- [16] WHO, 2009. Global status report on road safety. Time for action. WHO library cataloguing-in-publication data, World Health Organization 2009, ISBN 978-9-241563-84-0, Geneva, Switzerland.
- [17] Zezhi C, Pears, N, Freeman, M, & Austin, J 2009. Road vehicle classification using support vector machines. *Intelligent Computing and Intelligent Systems*, 2009. ICIS 2009. IEEE International Conference On , 4 214-218. doi:10.1109/ICICISYS.2009.5357707
- [18] Philip H. S. Torr and Andrew Zisserman. MLESAC: A New Robust Estimator with Application to Estimating Image Geometry. *Computer Vision and Image Understanding*, 78(1):138-156, 2000.
- [19] Cesar H. Rodriguez Garavito, Aurelio Ponz, Fernando Garcia, David Martin, Arturo de la Escalera, and Jose M. Armingol. Automatic Laser And Camera Extrinsic Calibration for Data Fusion Using Road Plane. In *Proc. IEEE International Conference on Information Fusion (FUSION)*, 2014.

T-SCAN: OBTENCIÓN DE NUBES DE PUNTOS CON COLOR Y TEMPERATURA EN INTERIOR DE EDIFICIOS

T. Prado, B. Quintana, S. A. Prieto, A. Adán

3D Visual Computing and Robotics Lab, Universidad de Castilla-La Mancha. Ciudad Real, España.

Tomas.Prado@alu.uclm.es, {Blanca.Quintana, Samuel.Prieto, Antonio.Adan}@uclm.es

Resumen

Este artículo presenta el sistema T-Scan (Thermal Scan) dedicado a realizar una captación de nubes de puntos densas con información de color y temperatura. El sistema forma parte del proyecto T-BIM (Thermal Building Information Models) en el que se pretende generar de forma automática modelos semánticos térmicos de edificios, con el objetivo de integrarlos en los actuales modelos normalizados BIM. El artículo presenta el sistema sensorial, la calibración, metodología y los resultados experimentales en entornos reales.

Palabras Clave: Tecnologías láser escáner, Imagen térmica, Procesamiento de datos 3D, modelado 3D, BIM.

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de generación de modelos 3D a partir de datos de nubes de puntos para ser usados con fines de modelado de energía consiste básicamente en tres etapas: colección de datos, modelado y análisis. En la práctica, la toma de datos se lleva a cabo de forma manual por auditores de energía, tomando muestras locales de la escena. La ejecución manual de estas tareas puede ser lenta, costosa e incompleta.

El desarrollo de métodos automáticos de toma de datos para generar modelos 3D térmicos densos de interiores de edificios es una línea puntera que entrará en breve a formar parte del proceso global de creación de modelos BIM. Este artículo está dedicado a exponer el componente sensorial y la creación de una de nube de puntos térmica que es utilizada en las etapas posteriores de modelado semántico y análisis de la información 3D térmica.

2. ESTADO DEL ARTE

La adquisición y modelado de datos 3D es un campo de investigación tratado desde hace varios años por multitud de autores. Sin embargo, la inclusión de información térmica en datos 3D es un aspecto

novedoso y que comienza a ser de gran interés en la comunidad científica [2].

La idea principal consiste en incorporar una cámara térmica a un sistema de adquisición de datos 3D para aportar información térmica a una nube de puntos. Se pueden encontrar distintos sistemas, desde sistemas con fotogrametría [4] y cámaras de profundidad [9] hasta sistemas más precisos basados en escáneres 3D y tecnología LiDAR [1,3,6–8,10].

La operación clave del proceso consiste en calibrar ambos sistemas de adquisición entre sí, de manera que los datos térmicos puedan proyectarse sobre la nube de puntos 3D. Ham et al. [4] presentan un sistema únicamente compuesto por una cámara térmica FLIR E60, capaz de adquirir tanto imágenes térmicas como digitales. Un modelo 3D, tanto térmico como espacial, es generado mediante una calibración extrínseca e intrínseca (realizada con un panel compuesto por 42 bombillas LED). Posteriormente los modelos son alineados tomando puntos característicos elegidos por un usuario. Rangel et al. [9] usan un sistema compuesto por una cámara de profundidad Microsoft Kinect y una cámara térmica Jenoptik IR-TCM 640. Se sirve de un panel de calibración para obtener la relación geométrica entre ambas cámaras. Realizan un estudio exhaustivo sobre el material utilizado en dicho panel y la distribución geométrica del mismo, ya que los puntos de referencia deben ser visibles tanto en la imagen de profundidad como en la térmica, siendo finalmente utilizado un panel de cartón pluma con orificios circulares equi-espaciados. Borrmann et al. [1] presentan un sistema compuesto por un láser escáner 3D Riegl VZ-400 y una cámara térmica Optris PI160. Un panel de calibración es de nuevo usado para obtener la relación entre ambos sistemas de referencia, estando en este caso compuesto por 30 bombillas incandescentes. El sistema de adquisición de Mader et al. [8] difiere de los anteriores en el sentido de que no es un sistema integrado en un solo dispositivo, sino que se compone de tres drones cada uno equipado con un sensor diferente. Uno de los drones, equipado con un láser de rango Hokuyo UTM-30LX se encarga de obtener una nube de puntos 3D del escenario. Mientras que los otros dos drones, equipados con una cámara RGB y una cámara térmica FLIR A65

respectivamente, obtienen los datos de color e información térmica. La calibración entre los datos geométricos y las imágenes se realiza mediante un patrón compuesto por marcadores identificables por todos los sensores distribuido en el suelo. De manera similar a los métodos expuestos anteriormente, Chao Wang et al. [10] utilizan un patrón con forma de tablero de ajedrez para registrar los datos obtenidos mediante un LiDAR y una cámara térmica. Dicho patrón contiene huecos en las casillas blancas por los que, al ser colocado frente a un cuerpo caliente, se puede visualizar tanto en la imagen térmica como en la nube de puntos características comunes para realizar el registro.

Todos estos artículos presentan sistemas integrados de adquisición de información 3D con datos de temperatura. Sin embargo, otros autores proponen metodologías que permiten combinar información 3D con información térmica adquirida con sistemas independientes. Lagüela et al. [6] proponen una metodología que permite obtener la relación entre los datos geométricos y térmicos mediante un software comercial, eligiendo de manera manual puntos en común entre ambos escenarios y registrando así los datos. Para la adquisición de datos utilizan un láser escáner 3D Riegl LMS-Z390i y una cámara térmica NEC TH9260. En este caso el panel de calibración (compuesto por 64 bombillas) es utilizado para la calibración intrínseca de la cámara térmica y posterior corrección de la distorsión. Por el contrario, González-Aguilera et al. [3] presentan una metodología para el registro automático de la información de ambos sensores, identificando puntos singulares tanto en la nube de puntos 3D (obtenida mediante un Faro Photon 80) como en las imágenes térmicas (obtenidas mediante una FLIR ThermoCAM SC640), obteniendo así la transformación necesaria para proyectar la información térmica sobre la nube de puntos. Por último, López-Fernández [7] et al. también presentan un método que permite registrar la información de dos sistemas independientes. Por un lado, adquieren imágenes térmicas de cada pared con una cámara térmica NEC TH9260, y por otro adquieren nubes de puntos con un sistema de mapeado de interiores formado por un láser escáner 2D Hokuyo UTM-30LX, una IMU y dos encoders de canal dual. El proceso de registro entre ambos sistemas se realiza seleccionando características homólogas en ambas imágenes de manera manual.

3. CONTRIBUCIONES DEL MÉTODO

La diferencia fundamental del sistema que presenta este artículo radica en tres aspectos. En primer lugar, el sistema de calibrado es novedoso ya que se utilizan dianas (balizas) que incorporan a la vez discriminantes térmico y de reflectancia, lo que hace aumentar la precisión y eficiencia del sistema (Sección 5.2).

En segundo lugar, la posición de las dianas no está restringida a pequeñas regiones como en [1,9,10] (contenidas en pequeños tableros) - frecuentemente balizas activas (bombillas) [1,8], identificadas en tableros [9,10] o en características de la imagen [3,4,6,7]. Por el contrario, nuestras balizas pueden abarcar un espacio amplio de la escena, en posiciones lejanas del escáner, y donde no existen restricciones en su posicionamiento. Como consecuencia, la calibración es más fiable y precisa.

En tercer lugar, muchos de los sistemas referenciados no tratan el problema de completitud del espacio observable, por lo que solamente obtienen un mapa térmico parcial de la escena. El sistema T-Scan está preparado para realizar un mapa térmico 3D completo del espacio debido a que realiza una integración de tomas desde una o distintas posiciones, consiguiendo un mapa acumulado muestreado que cubre todo el escenario (Sección 6).

4. 3D T-SCAN

El sistema escáner 3D térmico desarrollado se muestra en la Figura 1. Este sistema capta nubes de puntos con información de color (RGB) y temperatura. Consta del escáner 3D RIEGL VZ-400, la cámara RGB Nikon D90 y la cámara térmica FLIR Series AX5 A65.

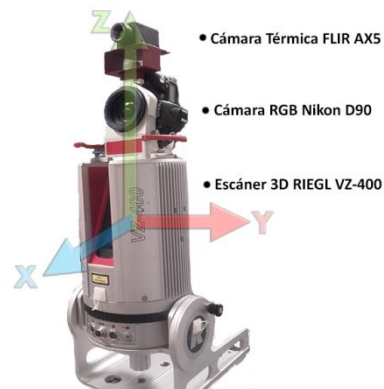


Figura 1: Imagen del sistema 3D T-Scan. Se ilustra el sistema de coordenadas universal utilizado.

El escáner 3D RIEGL VZ-400 es un escáner 3D láser terrestre capaz de captar coordenadas 3D de su entorno utilizando un haz láser de clase uno. Presenta una distancia máxima de escaneo de 600 m, con un ángulo de visión horizontal de 360° y vertical de 30° a 130°. Posee un engranaje que le permite ser inclinado hasta 90°, permitiendo así escanear suelos y techos. Los rangos de paso de barrido horizontal y vertical son [0.0024°, 0.5°] y [0.0024°, 0.28°], permitiendo amoldarse a las necesidades del usuario.

La cámara RGB Nikon D90 tiene una óptica con apertura 170° y resolución de 4288x2848 píxeles. Por su parte la cámara térmica FLIR A65 posee una resolución de 640x512 píxeles y un campo de visión de 45x37° captados a una frecuencia de 30Hz. Se trata de una cámara muy versátil ya que permite ajustar la precisión y el rango de temperaturas captado gracias a la posibilidad de configurarla de dos modos, “HighMode”, lo que nos dará un rango de temperaturas de 233-823°K con una precisión de 0.4° y “LowMode”, que permite un rango de temperaturas de 248-408°K con una precisión de 0.04°.

El sistema se ha diseñado para funcionar en dos fases (ver Figura 2). La fase 1 consiste en la calibración de los elementos del sistema y es necesaria ejecutarla una única vez. Los resultados de calibración son usados como base para la toma de datos 3D-térmicos en la fase 2.

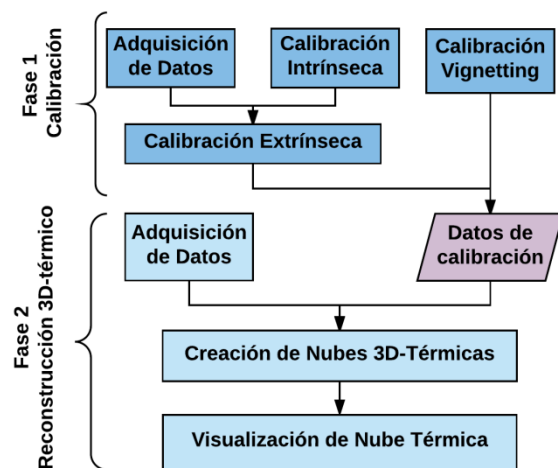


Figura 2: Esquema funcionamiento del escáner 3D térmico

5. CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

En primer lugar, es necesario llevar a cabo un conjunto de calibraciones, no sólo de cada elemento del sistema por separado, sino también de la integración entre los mismos.

5.1 CALIBRACIÓN DE LAS CÁMARAS

Con objeto de obtener imágenes de máxima calidad se realiza un proceso de calibración intrínseco en donde se obtienen los parámetros que regulan la distorsión presente en la imagen, tanto para la cámara RGB como para la cámara térmica. El procedimiento usado para obtener los parámetros intrínsecos ha sido el seguido por Heikkilä et al. [5]. Con los parámetros intrínsecos de distorsión radial (k_1 , k_2 , k_3) y tangencial (p_1 , p_2), se calcula la nueva posición de los píxeles (X_n , Y_n) de la imagen sin distorsión como:

$$\begin{aligned} X_n &= X(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + 2Yp_1 + p_2(r^2 + 2X^2) \\ Y_n &= Y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + 2Xp_2 + p_1(r^2 + 2Y^2) \end{aligned} \quad (1)$$

Con $r = \sqrt{X^2 + Y^2}$

La cámara térmica además presenta una distorsión conocida como *vignetting*, la cual produce un ennegrecimiento de los bordes de la imagen, falseando de esta manera la información térmica obtenida (ver Figura 3). Para lograr corregir esta distorsión es necesario conocer el porcentaje de pérdida de temperatura en función de su distancia con el centro de la imagen.

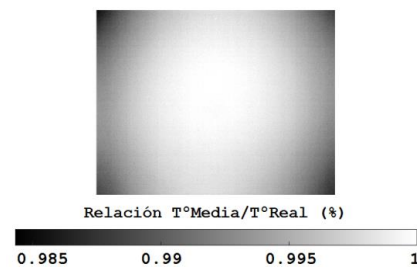


Figura 3: Efecto *vignetting* observado en una imagen térmica

La calibración del efecto *vignetting* ha sido modelada utilizando un panel de madera de temperatura conocida y constante. La calibración proporciona una función de pérdida radial de temperatura. Para obtener los valores corregidos en la imagen térmica sólo es necesario dividir cada píxel de la imagen entre su porcentaje de pérdida. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.

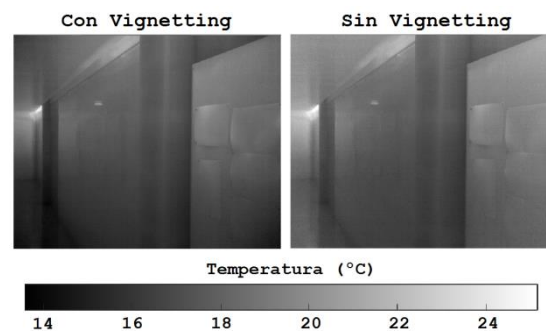


Figura 4: Imagen térmica corregida de *vignetting*

5.2 CALIBRACIÓN DEL SISTEMA ESCÁNER-CÁMARA TÉRMICA

La asociación entre píxeles de la imagen térmica I_T con puntos de la nube 3D captada por el escáner requiere calcular la matriz de transformación proyectiva correspondiente. Esta es una transformación que relaciona las coordenadas de la nube de puntos con las coordenadas, en píxeles, de los

correspondientes puntos proyectados en la imagen térmica. La transformación se modela en la ecuación siguiente:

$$\begin{pmatrix} \lambda X_f \\ \lambda Y_f \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

la ecuación (2) puede ser expresada como:

$$\begin{pmatrix} X_f \\ Y_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_p & Y_p & Z_p & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_f X_p & -X_f Y_p & -X_f Z_p \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_p & Y_p & Z_p & 1 & -Y_f X_p & -Y_f Y_p & -Y_f Z_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} \\ r_{12} \\ r_{13} \\ r_{14} \\ r_{21} \\ r_{22} \\ r_{23} \\ r_{24} \\ r_{31} \\ r_{32} \\ r_{33} \end{pmatrix}$$

Para n pares de coordenadas correspondientes, se forma un sistema sobredeterminado:

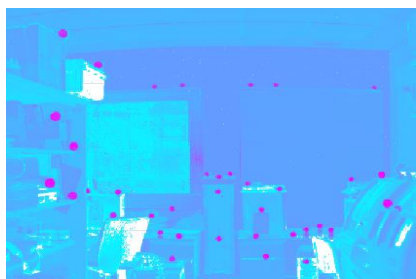
$$\begin{pmatrix} X_{p1} \\ Y_{p1} \\ \vdots \\ X_{pn} \\ Y_{pn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{p1} & Y_{p1} & Z_{p1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{p1} & Y_{p1} & Z_{p1} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{pn} & Y_{pn} & Z_{pn} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{pn} & Y_{pn} & Z_{pn} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{11} \\ F_{12} \\ F_{13} \\ F_{14} \\ F_{21} \\ F_{22} \\ F_{23} \\ F_{24} \\ F_{31} \\ F_{32} \end{pmatrix} \quad (3)$$

que puede ser expresado como $\mathbf{C} = \mathbf{W}\mathbf{P}$.

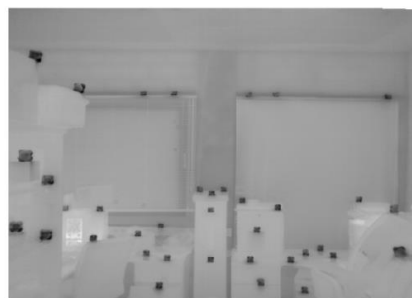
Conocidas las coordenadas de los píxeles (X_f, Y_f), las correspondientes coordenadas 3D de los puntos asociados (X_p, Y_p, Z_p), e imponiendo $r_{34} = 1$, la ecuación (3) queda resuelta por:

$$\mathbf{P} = (\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1} \mathbf{W}^T \mathbf{C} \quad (4)$$

En la práctica, en el procedimiento de calibración se utilizan dianas reflectantes pegadas en pequeños cubos de plástico de hielo. Como se puede apreciar en la Figura 5, esto facilita la localización de los mismos tanto en la imagen de reflectancia asociada a la nube de puntos 3D como en la imagen térmica. El emparejamiento de puntos correspondientes se realiza mediante un algoritmo de búsqueda por posicionamiento de dianas en la imagen y posterior refinamiento verificando la coherencia entre los conjuntos correspondientes.



a)



b)

Figura 5: Localización de dianas. a) Imagen de reflectancia. b) Imagen térmica

La matriz de transformación es recalculada minimizando el error entre las coordenadas obtenidas mediante la ecuación (2), (X'_f, Y'_f) , y las detectadas en la imagen, (X_f, Y_f) . Para ello se toma un conjunto de puntos vecinos del centroide de la diana, se aplica de nuevo la ecuación (4) y se toma la matriz de transformación que proporciona el mínimo error (ver diagrama de flujo de la Figura 6).

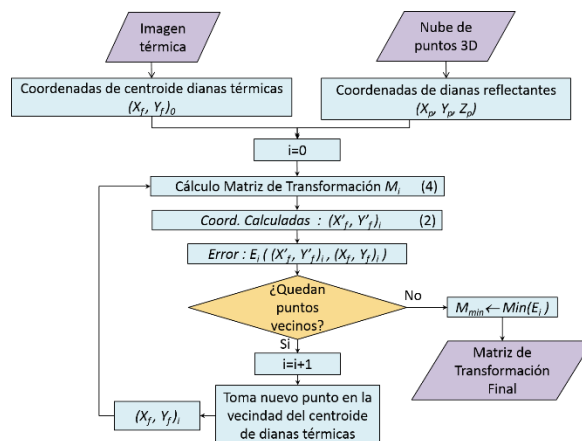


Figura 6: Refinamiento de la matriz de transformación proyectiva

6. OBTENCIÓN DE LA NUBE DE PUNTOS TÉRMICA DEL ESPACIO OBSERVABLE

6.1 INTEGRACIÓN DE IMÁGENES TÉRMICAS EN LA NUBE DE PUNTOS

El procedimiento seguido para la inclusión de un conjunto de imágenes térmicas en la nube de puntos está explicado en el diagrama de flujo de la Figura 7.

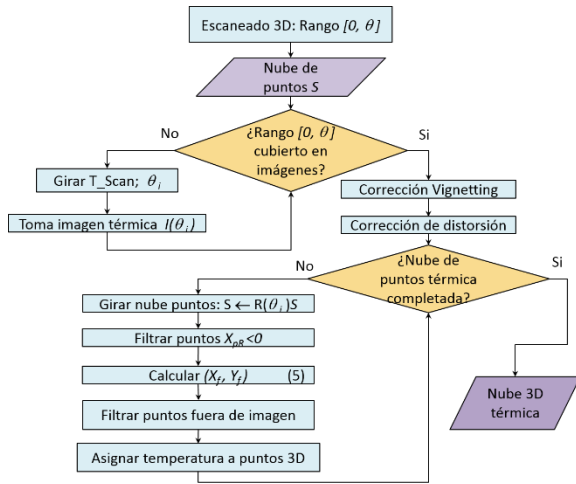


Figura 7: Proceso creación Nubes 3D térmicas

El sistema 3D T-Scan realiza la toma de datos en tres fases secuenciales. En la primera fase el escáner 3D capta las coordenadas 3D de puntos alcanzados por el láser en un espacio definido por el rango de ángulos vertical λ y horizontal θ fijados por el usuario. Normalmente el rango de λ se mantiene en $[30^\circ, 130^\circ]$, mientras que el rango de θ es fijado a voluntad.

En la segunda fase, las cámaras RGB y térmica realizan, partiendo de $\theta = 0$, el número de tomas necesarias para cubrir totalmente el rango de θ elegido en la sesión. De acuerdo con el campo de visión de las cámaras, cada toma de imágenes se realiza después de girar el 3D T-Scan en θ lo necesario para que exista un mínimo solape entre imágenes térmicas consecutivas.

En la tercera fase se trata de preprocesar las imágenes y de asignar la temperatura a la nube de puntos tomada en la fase primera. El preprocesamiento consta esencialmente de la eliminación del *vignetting* y de la corrección de distorsión.

Realizadas m tomas en los ángulos $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$, las coordenadas de los puntos proyectados en cada imagen térmica $I(\theta_1), I(\theta_2), \dots, I(\theta_m)$ son calculados después de haber incluido las correspondientes matrices de rotación $R(\theta_1), R(\theta_2), \dots, R(\theta_m)$ en la ecuación (2). Formalmente la expresión es:

$$\begin{pmatrix} X_f \\ Y_f \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Hay que hacer notar que, después de la rotación de las coordenadas 3D iniciales con cada matriz R , los puntos con coordenadas $X_{pR} < 0$ son filtrados, ya que corresponderían a proyecciones de puntos por detrás de la cámara.

Por último, los valores de coordenadas (X'_f, Y'_f) que se salen de rango de la dimensión de la imagen son también filtrados en el proceso. En nuestro sistema $0 < X'_f \leq 640$ y $0 < Y'_f \leq 512$. Finalmente, un punto 3D válido tendrá uno o varios valores de temperatura asignados. Esto es debido a que existe un pequeño solapamiento entre imágenes consecutivas por lo que el mismo punto 3D puede estar proyectado en dos imágenes térmicas. En ese caso, el valor final asignado es el valor medio de ambas temperaturas asignadas. Finalmente, se consigue la nube de puntos térmica (NPT).

La Figura 8 muestra la asignación de temperatura para una sola imagen térmica, mientras que la Figura 9 ilustra el resultado de integrar tres imágenes térmicas consecutivas sobre una parte de la nube de puntos.

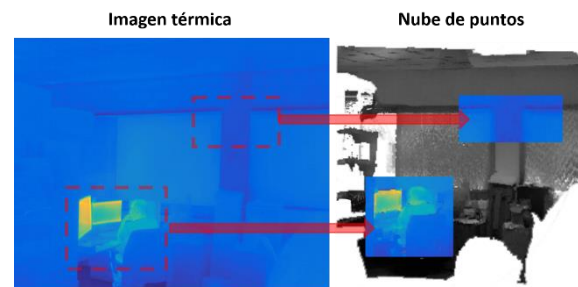


Figura 8: Ilustración de una imagen térmica y asignación de color en la nube de puntos. La figura muestra la asignación de dos partes de puntos sobre la nube de puntos.

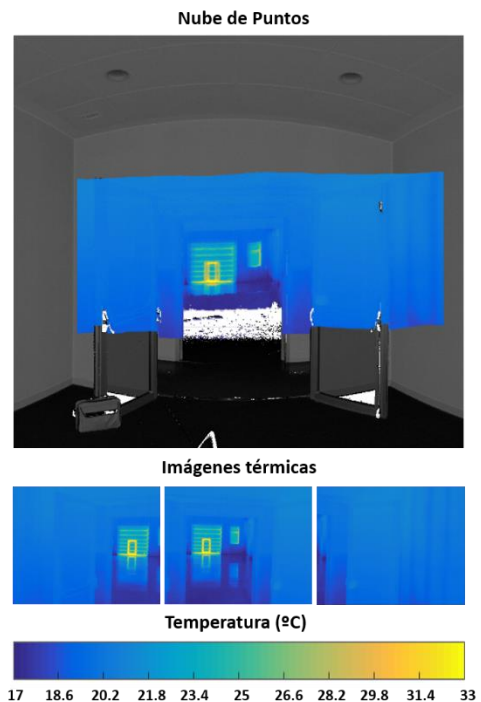


Figura 9. Integración de varias imágenes térmicas en una nube de puntos.

6.2 INTEGRACIÓN DE VARIAS NUBES DE PUNTOS TÉRMICAS.

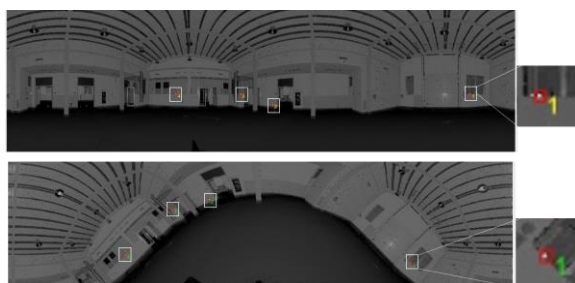
Como se expuso en la Sección 2, el sistema 3D T-Scan no es capaz de muestrear todo el espacio visible debido a que el rango de λ está limitado. Esto causa la existencia de dos conos (inferior y superior) en el que no se registran datos. Por otra parte, debido a oclusiones causadas principalmente por el mobiliario existente, una toma de escáner es insuficiente para generar un modelo 3D térmico completo de la estructura arquitectónica de la escena. Por estas razones, para generar un mapa térmico completo de una escena, se necesitan varias tomas desde varias posiciones.

La integración de varias NPTs tomadas en diferentes posiciones del escáner sigue un procedimiento usual de un registro de nubes de puntos. Se utilizan marcas reflectantes distribuidas en la escena, con el requerimiento de ser visibles desde distintas posiciones.

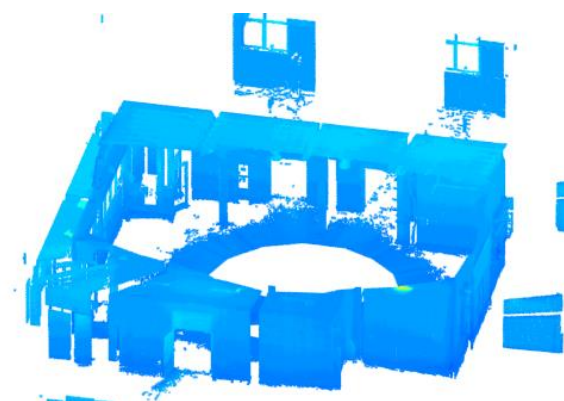
Para realizar el registro de dos NPTs, se genera una imagen polar de reflectancia y se asocian las marcas correspondientes (Figura 10 a)). Con cuatro o más parejas de marcas, se calcula la matriz de transformación de las NPTs y se pasa a un sistema de referencia común, que normalmente ha sido fijado en la posición de la primera sesión de escaneo.

Este proceso es secuencial desde la primera a la última NPT. En cada iteración se genera una nube acumulada (Figura 10 b)) en la que se llevan a cabo dos procesos.

1. Registro y muestreo con la nube anterior. El muestreo se realiza a través de un filtrado de rejilla de vóxeles (*box grid filter*), reduciendo el tamaño de la nube acumulada.
2. Obtención de color y temperatura de la nube reducida. Se realiza igualmente recurriendo al promedio de color y temperatura por vóxel.



a)



b)

Figura 10. a) Imágenes polares de dos nubes de puntos y dianas reflectantes correspondientes. b) Nube de puntos térmica acumulada reducida.

7. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El sistema T-Scan ha sido puesto a punto en el 3D Visual Computing & Robotics Lab de la Universidad de Castilla La Mancha y probado en entornos reales. En este apartado se presentan los resultados obtenidos en un caso de estudio.

Se ha realizado el modelo de nube de puntos térmica de una parte del Instituto de Ciencias de la Edificación en el campus de Cuenca de la Universidad de Castilla La Mancha. Este trabajo se ha realizado en varias sesiones de trabajo durante tres días. En total se realizaron 87 tomas de escáner desde 27 posiciones, con el siguiente volumen aproximado de datos: 435 millones de puntos espaciales de escáner, de los cuáles un 76% tiene color asignado y un 40% contiene información térmica. En el proceso de toma de datos se utilizaron 40 dianas reflectantes. La planta y las posiciones del escáner pueden verse en la Figura 11.

El rango en θ fue de $[0, 360^\circ]$, con un paso de barrido del escáner de 0.08° . Se tomaron 15 fotografías para un giro completo del escáner.

Los tiempos invertidos en la toma de datos es el siguiente: toma de datos de escáner (en rango de 360°) 47 seg, toma de imágenes color y térmicas 60 seg.

La Figura 12 muestra el resultado del modelo térmico de una sala del edificio con un pseudocolor insertado. Se aprecian claramente salidas de calefacción en un tono amarillo, así como pequeñas variaciones de color en las paredes. Esta pequeña variación se hace más evidente en la parte baja de la pared donde hay supuestas humedades.

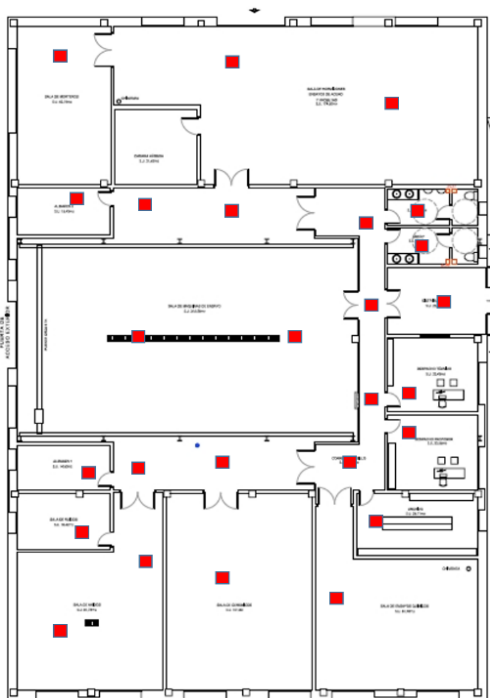


Figura 11. Posiciones del sistema T-Scan en el escenario del trabajo.



a)



b)

Figura 12. a) Imagen la nube de puntos térmica en una de las salas del edificio. Se aprecia variación de temperatura en distintos componentes del edificio y salidas calientes de aire. b) Detalle de variación de temperatura en la parte inferior de las paredes.

8. CONCLUSIONES

El objetivo general del artículo es presentar un sistema sensorial junto con su metodología asociada para obtener modelos de nubes de puntos térmicos de interiores de edificaciones. Este sistema se integra como una primera etapa para generar soluciones de ingeniería inversa sobre la creación automática de modelos 3D BIM térmicos y su monitorización en el tiempo.

El sistema T-Scan se ha diseñado para cubrir el espacio observable mediante integración de varias tomas desde varias posiciones. La nube térmica integrada es muestreada a cada iteración con objeto de no saturar la memoria, obteniendo finalmente un modelo completo asumible para ser posteriormente procesado en la etapa de obtención del modelo semántico térmico del edificio. El sistema ha sido probado en una planta de 40.70 m × 28.45 m con 18 salas obteniendo resultados muy satisfactorios.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos AEI/FEDER, UE. DPI2013-43344-R (Ministerio Español de Economía y Competitividad), PEII-2014-017-P (Gobierno de Castilla la Mancha) y la beca predoctoral UCLM con el número de referencia PREDUCLM16/23.

Referencias

- [1] D. Borrmann, A. Nüchter, M. Đakulović, I. Maurovic, I. Petrović, D. Osmankovic, J. Velagić, A mobile robot based system for fully automated thermal 3D mapping, *Adv. Eng. Informatics*. (2014).
- [2] Y.K. Cho, Y. Ham, M. Golpavar-Fard, 3D as-is building energy modeling and diagnostics: A review of the state-of-the-art, *Adv. Eng. Informatics*. 29 (2015) 184–195.
- [3] D. González-Aguilera, P. Rodríguez-Gonzálvez, J. Armesto, S. Lagüela, Novel approach to 3D thermography and energy efficiency evaluation, *Energy Build.* 54 (2012) 436–443.
- [4] Y. Ham, M. Golparvar-Fard, An automated vision-based method for rapid 3D energy performance modeling of existing buildings using thermal and digital imagery, *Adv. Eng. Informatics*. 27 (2013) 395–409.
- [5] J. Heikkilä, O. Silven, A four-step camera calibration procedure with implicit image correction, *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.* (n.d.) 1106–1112.
- [6] S. Lagüela, J. Martínez, J. Armesto, P. Arias, Energy efficiency studies through 3D laser scanning and thermographic technologies, *Energy*

- Build. 43 (2011) 1216–1221.
- [7] L. Lopez-Fernandez, S. Lagu ela, D. Gonzalez-Aguilera, H. Lorenzo, Thermographic and mobile indoor mapping for the computation of energy losses in buildings, *Indoor Built Environ.* 0 (2016) 1–14.
- [8] D. Mader, R. Blaskow, P. Westfeld, C. Weller, Potential of UAV-Based laser scanner and multispectral camera data in building inspection, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.* 2016–Janua (2016) 1135–1142.
- [9] J. Rangel, S. Soldan, A. Kroll, 3D Thermal Imaging: Fusion of Thermography and Depth Cameras, in: 2014 Quant. InfraRed Thermogr., 2014.
- [10] C. Wang, Y.K. Cho, M. Gai, As-Is 3D Thermal Modeling for Existing Building Envelopes Using a Hybrid LIDAR System, *J. Comput. Civ. Eng.* 27 (2013) 645–656.

EVALUACIÓN DE MÉTODOS PARA REALIZAR RESÚMENES AUTOMÁTICOS DE VÍDEOS

Pablo Rubio Fernández

Escuela de Ingenierías Industrial e Informática, Campus de Vegazana s/n 24071 León, España,
prubif00@estudiantes.unileon.es

Eduardo Fidalgo Fernández

Escuela de Ingenierías Industrial e Informática, Campus de Vegazana s/n 24071 León, España,
efidf@unileon.es

Enrique Alegre Gutiérrez

Escuela de Ingenierías Industrial e Informática, Campus de Vegazana s/n 24071 León, España,
ealeg@unileon.es

Víctor González Castro

Escuela de Ingenierías Industrial e Informática, Campus de Vegazana s/n 24071 León, España,
victor.gonzalez@unileon.es

Resumen

En este trabajo se estudian, presentan y evalúan tres métodos que permiten realizar resúmenes de vídeos de manera automática, manteniendo la información del vídeo que cada uno de los métodos presentados considera como esencial. Se han revisado los métodos Video2GIF, basado en una red neuronal convolucional de aprendizaje profundo, Move Detector, un algoritmo que detecta y almacena los fotogramas que contienen movimiento, y Peaks Volume, que resume en función de un análisis del espectro de audio del vídeo. La evaluación de los métodos Video2GIF y Peaks Volume se ha realizado utilizando el dataset VSUMM, y la evaluación del método Move Detector, utilizando el dataset VIRAT. Los resúmenes obtenidos se han evaluado utilizando CUS (Comparison of User Summaries). A partir de los mismos se puede concluir que los resultados obtenidos con Video2GIF contienen la información más relevante del vídeo original cuando este contiene escenas cortas que albergan acciones humanas, dado que este método utiliza una red entrenada con dicho propósito, mientras que Peaks Volume ha destacado en el resumen de documentales, pero también ha conseguido unos resultados superiores a 0.4 sobre 1 en el resto de categorías de vídeos reduciendo la duración del vídeo original a la mitad o menos.

Palabras Clave: Fotograma clave, resumen de vídeo, red neuronal convolucional, aprendizaje profundo, Python, CUS.

Actualmente, cada día se capturan y registran multitud de momentos de nuestra vida cotidiana a través de cámaras y teléfonos móviles. Para hacerse una idea, la plataforma Youtube recibe diariamente una media de 100 horas de vídeos por minuto, haciendo que escenas importantes pasen desapercibidas entre grandes cantidades de datos de vídeos. Por este motivo, el disponer de técnicas de resumen automáticos eficientes para extraer información de grandes cantidades de vídeo en el menor tiempo posible resulta fundamental para la labor diaria de determinadas personas. Por ejemplo, la extracción de inteligencia, de evidencias de tipo vídeo recibidas a diario por parte de los cuerpos y fuerzas de seguridad del estado se vería notablemente agilizada con el uso de dichas técnicas.

Un buen resumen tiene que capturar los momentos clave del vídeo original, manteniendo una coherencia temporal y reduciendo la duración del vídeo lo máximo posible, sin que se pierda información relevante.

En este trabajo se han analizado tres métodos diferentes, explicando su funcionamiento y realizando una pequeña evaluación contra conjuntos de datos disponibles públicamente para poder juzgar la calidad de los resúmenes obtenidos. En la sección 2 se realiza un repaso del estado del arte. La metodología de trabajo de los métodos Video2GIF, Peaks Volume y Move Detector se explica en la sección 3. En la sección 4 se muestra el detalle de la experimentación realizada y, por último, en la sección 5, se presentan brevemente las conclusiones a las que se ha llegado tras la experimentación realizada.

1 INTRODUCCIÓN

2 ESTADO DEL ARTE

En esta sección se revisa el estado del arte en torno a los tres métodos sobre los que se ha realizado la investigación.

2.1 RESÚMENES DE VÍDEOS EN FUNCIÓN DE SU AUDIO

Existen varias propuestas para resumir los vídeos automáticamente analizando el audio del mismo. Reconocer el género del audio (discurso, música, risas, gritos, etc.) y en función de este, detectar o no el plano en el que se graba a los protagonistas [8] es una de estas propuestas. Otra propuesta diferente consiste en cuantificar escenas de audio según la amplitud, frecuencia y energía instantánea de las modulaciones, ayudándose además de mapas de calor [11]. Jiang et al. [6] centraron su trabajo en vídeos de celebraciones y eventos. Primero, se segmenta el audio, utilizando BIC (Bayesian Information Criterion). Después, se calcula la modulación de la energía para distinguir entre discurso o música, o si una persona habla o canta. Una vez dividido el audio, se utiliza detección de rostros para intentar capturar a los protagonistas del evento, por ejemplo, los novios en el vídeo de una boda, y seleccionar así los fotogramas claves.

Furini et al. [2] propusieron un método para detectar los silencios del audio, y una vez detectados, realizaron tres experimentos. En el primero eliminaron todos los fotogramas asociados a los momentos de silencio, en el segundo reprodujeron esos fotogramas a una velocidad el doble de rápido de lo original, y en el tercero realizaron lo mismo que en el caso anterior, pero con una velocidad tres veces superior a la del vídeo original. Consideraron este tercer experimento como el mejor, pues reduce el tiempo del vídeo original y además mantiene todos los fotogramas para no perder detalle.

2.2 RESÚMENES DE VÍDEOS APLICANDO REDES NEURONALES

Gygli et al. [4] introdujeron un método que busca aprender la importancia de las características globales de un resumen de manera supervisada y optimizar estas para poder resumir una gran variedad de vídeos. La primera misión llevada a cabo fue el aprendizaje de la red convolucional. Después, se alimentó el sistema con unas funciones submodulares que le permiten captar los momentos clave del vídeo original en un resumen. Estas son: función de interés, que predice la importancia de un segmento del vídeo; función de representatividad, que evalúa la representación del vídeo original a través del resumen; función de uniformidad, que se encarga de que el resumen tenga

coherencia temporal. Finalmente, se entrenó el sistema con un conjunto de vídeos originales y sus correspondientes resúmenes, para poder realizar el ajuste de cada función de optimización y deducir así la importancia de estas para cada vídeo.

Xu et al. [15] contribuyeron en la mejora de las técnicas de encriptación necesarias para generar resúmenes de vídeos con redes neuronales convolucionales. También propusieron el uso de un conjunto de descriptores latentes como descriptores de fotogramas, los cuales diversifican la salida agregando múltiples localizaciones especiales en la etapa más profunda de la red.

2.3 RESÚMENES DE VÍDEOS ESTÁTICOS

Godbehere et al. [3] realizaron una separación entre el fondo y el primer plano en vídeos estáticos para detectar cualquier variación que se produzca entre estos, y además analizaron el audio de la zona en la que se realiza la grabación de vídeo, para así poder saber la dirección que llevan las personas, la velocidad a la que se desplazan, etc.

Kaewtrakulpong et al. [7] compartieron una mejora del modelo de mezcla Gaussiana adaptable que añade detección de sombras y seguimiento en tiempo real.

Zivkovic [16] también propuso una mejora del modelo de mezcla Gaussiana adaptable para la substracción del fondo que selecciona el número de componentes por píxel necesarios para adaptar la escena observada a las necesidades del objetivo final.

3 MÉTODOS

En esta sección se analizan detalladamente tres métodos para resumir vídeos automáticamente. El primero trabaja con redes neuronales convolucionales, el segundo realiza un análisis del audio del vídeo para generar el resumen y el tercero es un detector de movimiento utilizado para resumir vídeos estáticos.

3.1 VIDEO2GIF

Video2GIF [5] es una aplicación creada por Michael Gygli que utiliza una red neuronal convolucional, entrenada con parejas GIF y no GIF sobre un dataset creado por los autores, para resumir vídeos generando GIFs de los momentos más destacables. Los GIFs son un formato de imagen de poca duración, sin sonido, que reproduce múltiples fotogramas en bucle.

3.1.1 Arquitectura y entrenamiento de la red neuronal

Video2GIF utiliza la arquitectura de red neuronal C3D propuesta por Tran et al. [14]. Para encontrar la mejor configuración, se realizaron pruebas con distintos modelos de red sobre el dataset UCF101, que contiene vídeos de 101 acciones humanas. La arquitectura de red de las primeras pruebas fue la siguiente: 5 capas convolucionales de 64, 128, 256, 256 y 256 filtros respectivamente, seguidas cada una de ellas de una capa de reducción (pooling), 2 capas totalmente conectadas y una capa softmax loss. De los primeros experimentos se concluyó que los mejores resultados se obtenían cuando todas las capas convolucionales tenían profundidad de kernel 3.

Para el aprendizaje de características espacio-temporales, diseñaron una arquitectura diferente basada en lo anterior, con 8 capas convolucionales de 64, 128, 256, 256, 512, 512, 512 y 512 filtros respectivamente, 5 capas de reducción, 2 capas totalmente conectadas de 4096 salidas cada una y una capa de salida softmax.

El entrenamiento de la red se realizó en un dataset creado por los autores de Video2GIF que reúne más de 100.000 GIFs animados y más de 80.000 de los vídeos originales de estos GIFs. Los GIFs se alinean con sus respectivos vídeos originales para así poder obtener los segmentos no seleccionados del vídeo, los cuáles sirven como muestras negativas en el entrenamiento (no GIFs). Para entrenar a la red, los autores realizaron comparaciones entre más de 500.000 parejas de GIFs y no GIFs.

3.1.2 Funcionamiento de Video2GIF

El primer paso que realiza la aplicación, es crear la red neuronal convolucional, con la arquitectura mencionada en el subapartado anterior. Después, divide el vídeo en segmentos no superpuestos. Para ello, utiliza el algoritmo de detección de límites de escena que detecta los cambios de toma, propuesto por Song et al. [12], en el que dada una matriz X y un número de puntos de cambio k , el objetivo se reduce a encontrar una aproximación constante de $H \in R^{dxn}$ en la que H minimice el error de reconstrucción $\min_H \|X - H\|$. Los puntos de cambio se encuentran tomando la derivada discreta de primer orden de H y buscando las localizaciones de los valores distintos de 0. La fórmula es:

$$\min_H \frac{1}{2} \|X - H\|_F^2 + \lambda \sum_{t=1}^{n-1} \|\mathbf{H}_{:,t+1} - \mathbf{H}_{:,t}\|_2 \quad (1)$$

donde $\|\cdot\|_F$ es la norma de Frobenius. El primer término mide el error de reconstrucción, el segundo es la variación total, y $\lambda > 0$ controla la relativa importancia entre ambos.

Una vez realizada la división de segmentos, el siguiente paso es puntuarlos. Durante el entrenamiento, la entrada es una pareja de segmentos GIF y no GIF. El conjunto de segmentos no GIF $\{s^-\}$ serán todos los segmentos del vídeo que no formen parte de los GIFs de ese vídeo incluidos en el dataset, y el conjunto de segmentos GIF $\{s^+\}$ serán los segmentos GIF de cada vídeo disponibles en el dataset. El modelo aprende una función $h: R^d \rightarrow R$ que mapea un segmento s para dar un valor $h(s)$ a su aptitud como GIF. El programa aprende la función comparando parejas de entrenamiento de forma que el conjunto de segmentos GIF $\{s^+\}$ obtenga una puntuación más alta que el conjunto de segmentos no GIF $\{s^-\}$. Durante la evaluación, la aplicación sólo recibe un segmento, y calcula su idoneidad como GIF mediante la función aprendida de puntuación. Por último, calcula el valor $h(s)$ para todos los segmentos $s \in S$ del vídeo y produce un ranking ordenado según las puntuaciones.

Finalmente, la función de pérdida Huber describe la penalización incurrida en los GIFs de menor calidad. La fórmula de la función de pérdida Huber utilizada por Video2GIF es la siguiente:

$$l_{Huber}(s^+, s^-) = \begin{cases} \frac{1}{2} l_2(s^+, s^-), & \text{if } u \leq \delta \\ \delta l_1(s^+, s^-) - \frac{1}{2} \delta^2, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

donde $u = 1 - h(s^+) + h(s^-)$. El parámetro δ define el punto en el cual la pérdida comienza a ser lineal, y tendrá un valor dependiente de la calidad del GIF, siendo más alto para los GIFs de mejor calidad. l_1 y l_2 vienen dados por la fórmula (3) para los valores $p=1$ y $p=2$ respectivamente.

$$l_p(s^+, s^-) = \max(0, 1 - h(s^+) + h(s^-))^p \quad (3)$$

Finalmente, definen el objetivo como la pérdida total sobre el dataset D y un término de regulación con la norma de Frobenius al cuadrado en el modelo de pesos W :

$$L(D, W) = \sum_{S_i \in D} \sum_{(s^+, s^-) \in S_i} l_{Huber}(s^+, s^-) + \lambda \|W\|_F^2 \quad (4)$$

donde λ es el parámetro de regulación.

3.1.3 Evaluación y resultados

Los autores de Video2GIF utilizan mean Average Precision (mAP) y Meaningful Summary Duration (MSD) para evaluar los resúmenes de vídeos.

El primer método, mean Average Precision, calcula la precisión con la que el programa captura los mejores momentos, es decir, los que compongan el ground truth. El segundo método, meaningful summary duration, se basa en agregar segmentos según su puntuación hasta cubrir los segmentos dados por el ground truth. Si alberga muchos segmentos de baja importancia en los primeros lugares obtendrá una puntuación de MSD baja.

Los resultados obtenidos por los autores se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1: Resultados de la evaluación del método Video2GIF

Método	nMSD ↓	mAP ↑
Joint embedding	54.38%	12.36%
Category-spec. SVM	52.98%	13.46%
Domain-spec. RankSVM	46.40%	16.08%
Classification	61.37%	11.78%
Rank, video agnostic	53.71%	13.25%
Rank, l_1 loss	44.60%	16.09%
Rank, l_2 loss	44.43%	16.10%
Rank, Huber loss	44.43%	16.22%
Rank, adaptative Huber loss	44.58%	16.21%
Rank, adaptative Huber loss + context (Ours)	44.19%	16.18%
Ours + model averaging	44.08%	16.21%
Approx. Bounds	38.77%	21.30%

3.2 PEAKS VOLUME

En esta subsección se detalla el algoritmo Peaks Volume, el cual resume el contenido de un vídeo en base a los picos de volumen detectados en el audio del mismo.

3.2.1 Funcionamiento de Peaks Volume

El algoritmo analiza el espectro de audio en busca de picos de volumen, los cuales se encontrarán cuando la gráfica del audio sufra un incremento y un descenso del volumen en el mismo punto.

El primer paso es abrir el vídeo indicado y extraer toda su pista de audio, para posteriormente, calcular el volumen y dibujarlo en una gráfica. El segundo paso consiste en hallar los picos. Para ello, se recorre la gráfica multiplicando incrementos por descensos, y obteniendo un resultado distinto de 0 en los puntos donde incremento y descenso se produzcan a la vez. Tras un pico, habrá un tiempo determinado en el que

no se podrán analizar otros picos, pues es evidente que dos picos de volumen muy seguidos seguramente pertenezcan a la misma acción. Finalmente, se recorta el vídeo en subclips asociados a los picos detectados, que se unirán dando lugar al resumen final.

3.3 MOVE DETECTOR

Para resumir vídeos estáticos grabados por cámaras fijas se utilizará el algoritmo Move Detector, que separa el fondo del primer plano para detectar movimiento.

3.3.1 Funcionamiento de Move Detector

Al iniciar el vídeo, el algoritmo captura el primer fotograma, que será el fondo inicial. Una vez capturado el fondo, el script empieza a analizar los fotogramas. Primero, redimensiona sus tamaños, y después, los convierte a escala de grises. Después, aplica un filtro Gaussiano para trabajar mejor con estos fotogramas. Tras el filtrado, se compara el fotograma de referencia con el resto de fotogramas extraídos mediante una substracción de imágenes, es decir, la diferencia en valor absoluto, píxel a píxel entre los diferentes fotogramas. El valor absoluto nos dará la intensidad de cada píxel diferente entre fondo y fotograma. Si este valor es superior a un umbral predeterminado y además el área ocupada por estos píxeles supera unas determinadas dimensiones, se considera que hay movimiento en el fotograma. El fotograma con movimiento detectado pasa a ser el nuevo fondo, sobre el que se realizarán estas mismas operaciones con el resto de fotogramas. Con el fondo cambiante se consigue que las variaciones de luz en el ambiente no sean detectadas continuamente como movimiento.

4 EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

Los experimentos han sido desarrollados con un ordenador portátil MSI con tarjeta gráfica NVIDIA GTX960M. Para utilizar la GPU, recomendada a la hora de crear la red neuronal artificial de Video2GIF, fue necesario instalar los programas NVIDIA Nsight HUD Launcher 5.2¹, NVIDIA GeForce Experience² y la biblioteca Cuda³.

Los datasets utilizados durante este experimento han sido:

-VSUMM [1]: Compuesto por vídeos de usuarios que contienen gran variedad de géneros, desde una serie de

¹ <https://developer.nvidia.com/gameworksdownload#?dn=nsight-visual-studio-edition-5-2-0>

² <http://www.nvidia.es/object/geforce-experience-es.html>

³ <https://developer.nvidia.com/cuda-downloads>

dibujos animados, hasta vídeos de fútbol, pasando por noticieros, documentales y por videoclips musicales. En la creación del ground truth de este dataset, que es el conjunto de fotogramas claves de cada vídeo, participaron varios usuarios que extrajeron los fotogramas claves de cada vídeo, permitiendo así evaluar cuantitativamente a través del método CUS la efectividad de los algoritmos de resúmenes automáticos.

-VIRAT [9]: Es un dataset de vídeos grabados con cámaras fijas, donde el fondo es estático y quedan registrados los movimientos de objetos móviles. En este dataset, el movimiento detectado de cada vídeo está incluido en documentos de texto donde aparecen registrados las coordenadas de cada fotograma que alberga movimiento. Los vídeos de este dataset no contienen audio.

-UCF101 [13]: Utilizado directamente por los autores de Video2GIF para realizar el entrenamiento de la red. Este dataset contiene vídeos de 101 acciones humanas, influyendo sobre los resultados finales que se obtienen en los resúmenes realizados con este método.

Se han elegido 6 vídeos aleatoriamente del dataset VSUMM para realizar los experimentos: los vídeos V11, V12, V79 y V107 de la carpeta *new_database* y los vídeos V21 y V42 de la carpeta *database*. V11 y V12 forman parte de una miniserie de dibujos animados. V79 es un vídeo corto de un partido de fútbol. V21 trata de un documental sobre el agua en inglés, similar a V42, y V107 es un videoclip musical.

4.1 MÉTODO DE EVALUACIÓN

Para evaluar los resúmenes de vídeos se ha utilizado el método CUS (*Comparison of User Summaries*) [1], el cuál realiza una comparación entre el resumen de usuario (ground truth) y el automático. Este método asigna una puntuación en función de los fotogramas claves que coincidan entre el resumen automático y el resumen presentado en el ground truth.

La fórmula del método CUS es la siguiente:

$$CUS_A = \frac{n_{MAS}}{n_{US}} \quad (4)$$

donde n_{MAS} es el número de fotogramas claves del resumen automático que coinciden con fotogramas claves del ground truth, y n_{US} es el número de fotogramas clave del resumen manual. El valor oscilará entre 0 y 1, siendo 1 el mejor resultado.

Se ha añadido una modificación propia a este método para tener en cuenta el tiempo del vídeo y el del resumen y poder puntuar más alto los resúmenes que más reduzcan la duración de los vídeos originales.

Para ello, se ha calculado el porcentaje de tiempo que el vídeo resumen dura en comparación con el vídeo original, y se ha dividido el resultado de la fórmula CUS_A entre este porcentaje. En las tablas nos referiremos a este método como CUS_A adaptado.

4.2 RESULTADOS

4.2.1 Resultados de los resúmenes realizados con Peaks Volume

En la Tabla 2 se puede observar que el vídeo V12 obtiene una mayor puntuación que el vídeo V21 a pesar de que tiene menor porcentaje de acierto de fotogramas claves, pero la duración de los resúmenes respecto a sus vídeos originales le otorgan una puntuación más alta en el método CUS adaptado.

Tabla 2: Puntuaciones CUS de los resúmenes realizados con Peaks Volume

Vídeos	% duración	Puntuación CUS_A	Puntuación de CUS_A adaptado
V11	39.1%	0.636	1.63
V12	42.1%	0.462	1.1
V21	56.9%	0.538	0.94
V79	61.7%	0.429	0.7
V107	60.9%	0.6	0.985
V42	58.4%	1	1.71

Algo importante, especialmente en los resúmenes de los vídeos V21, V42 y V107, y que no se evalúa en este trabajo, es la coherencia del audio. Pese a que tienen unos resultados próximos a 1 (muy superiores en el caso de V42, que obtiene el mejor resultado), la música o los discursos sufren cortes, muchas veces interrumpiendo una frase a la mitad.

La miniserie de los vídeos V11 y V12 no tiene conversaciones, sólo sonidos de movimiento, gritos, golpes, o risas. Este método capta muchas de las escenas clave y reduce el tiempo del vídeo original. En V79, se muestra un gol en un partido de fútbol con su celebración y sus repeticiones desde diferentes tomas. Este método capta el gol perfectamente, pero no así la celebración del jugador, dado que el nivel de sonido es menor tras el grito del gol.

4.2.2 Resultados de los resúmenes realizados con Video2GIF

Para resumir los vídeos con el método Video2GIF, se han obtenido 5 GIFs de cada vídeo analizado, de 5 segundos cada uno, y se han extraído todos los fotogramas de cada GIF. Entre los fotogramas, se ha buscado la coincidencia con los fotogramas claves dados en el dataset VSUMM. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Puntuaciones CUS de los resúmenes realizados con Video2GIF

Vídeos	% duración	Puntuación CUS _A	Puntuación de CUS _A adaptado
V11	54.3%	0.364	0.67
V12	43.9%	0.462	1.05
V21	No realizado	-	-
V79	53.2%	0.571	1.074
V107	12.1%	0.1	0.826
V42	28.1%	0.2	0.712

El método Video2GIF no ha podido resumir el vídeo V21, tras más de 12 horas de procesamiento. No se ha podido analizar la causa de este fallo, aunque se investigará en futuros experimentos con nuevos vídeos similares. Para el resto de los vídeos, el resumen se ha realizado en un tiempo medio de 4 minutos.

Como en este caso el usuario influye directamente en la duración de los resúmenes eligiendo cuantos GIFs quiere conseguir de cada vídeo, se ha seguido otro procedimiento en el que se analiza cuantos GIFs se necesitan para obtener el 50% y el 80% de los fotogramas claves del vídeo. De este modo, los resultados muestran los vídeos en los que Video2GIF ha capturado más fotogramas claves con menor número de GIFs, es decir, los vídeos en los que mejor captura las características clave. El procedimiento es el siguiente:

Inicialmente tenemos los 5 GIFs que tienen la puntuación más alta otorgada por el método Video2GIF. Seleccionamos el siguiente GIF del ranking de puntuación, extraemos todos sus fotogramas y comprobamos si captura alguno de los fotogramas claves del vídeo que aún no hubieran sido capturados. Repetimos este proceso siguiendo el orden de puntuación de Video2GIF hasta capturar el 50% y el 80% de los fotogramas claves de cada vídeo.

Tabla 4: Resultados cuando se han capturado más del 50% de los fotogramas claves

Vídeo	keyframes capturados (Puntuación CUS)	GIFs/ keyframes	% duración
V11	8/11 (0.727)	6/11 (0.545)	65.2%
V12	7/13 (0.538)	6/13 (0.462)	52.6%
V42	3/5 (0.6)	6/5 (1.2)	33.7%
V79	4/7 (0.571)	5/7 (0.71)	53.2%
V107	5/10 (0.5)	20/10 (2)	48.3%

La miniserie de los vídeos V11 y V12 requiere menos GIFs para obtener más del 50% de los fotogramas claves.

Tabla 5: Resultados cuando se han capturado más del 80% de los fotogramas claves

Vídeo	Keyframes capturados (Puntuación CUS)	GIFs/ keyframes	% duración
V11	9/11 (0.818)	7/11 (0.636)	76.1%
V12	11/13 (0.846)	9/13 (0.692)	78.9%
V42	4/5 (0.8)	12/5 (2.4)	67.4%
V79	6/7 (0.857)	8/7 (1.143)	85.1%
V107	8/10 (0.8)	33/10 (3.3)	79.7%

En este caso, vuelve a ser la miniserie de dibujos animados la que menos GIFs requiere para obtener más del 80% de los fotogramas claves (menos de un GIF por fotograma clave).

Con estos resultados podemos concluir que Video2GIF obtiene mejores resultados en vídeos cortos con mucha variedad de escenas distintas, y en los que estas escenas desarrollen toda su acción en unos pocos segundos. El ejemplo lo tenemos con V11 y V12, la miniserie de dibujos animados en la que los personajes sufren todo tipo de desgracias en un breve periodo de tiempo. En estos vídeos, Video2GIF necesitó menos de un GIF por escena clave para captar casi todos los fotogramas claves.

Por otra parte, en los vídeos con poca diversidad de escenas, como por ejemplo V79, un vídeo de fútbol que contiene un gol, varias repeticiones de este, y al goleador festejándolo, Video2GIF tiende a capturar el mismo tipo acciones, en este caso el gol y sus repeticiones. Por este motivo, se capturan más del 50% de los fotogramas claves utilizando aproximadamente 1 GIF por fotograma clave, pero la cantidad de GIFs necesarios para obtener casi todos los fotogramas aumenta cuando uno de estos fotogramas clave no está relacionado con el balón en juego. Para demostrar esto, escogimos el vídeo V80 del dataset VSUMM, que muestra imágenes de un partido de fútbol y que además también incorpora un logo de introducción a esta sección. Modificamos el vídeo de la siguiente forma:

Los primeros 5 segundos del vídeo son los mismos que los del vídeo original, el logo de introducción. Después, copiamos la primera escena del vídeo original (del segundo 5 al segundo 14) en nuestro vídeo 10 veces. En esta se muestra un rápido ataque que termina en penalti. Una vez realizada la modificación del vídeo, aplicamos sobre este el

método Video2GIF. Los resultados obtenidos mostraron que los 10 GIFs con mayor puntuación del ranking capturaban la misma escena, y el GIF que obtuvo menor puntuación fue el único que captó el logo de introducción.

Por último, se puede observar que para capturar los fotogramas claves de V107, el vídeoclip musical, necesitamos una gran cantidad de GIFs, debido a la similitud entre escenas del vídeo. Además, el hecho de que los GIFs no tengan sonido hace este método menos adecuado para vídeos con audio.

4.2.3 Resultados de los resúmenes realizados con Move Detector

Este método no se ha podido evaluar con CUS, dado que el dataset VIRAT no tiene fotogramas claves etiquetados manualmente. Los resúmenes capturan todo tipo de movimiento y eliminan los momentos en los que el fondo se encuentra desierto.

Para comentar brevemente la capacidad de este algoritmo, se han calculado los resúmenes sobre tres vídeos de VIRAT elegidos aleatoriamente: OVIRAT_S_000200_00_000100_000171, VIRAT_S_010000_00_000000_000165 y VIRAT_S_000001.

Tabla 6: Resultados de Move detector sobre vídeos del dataset VIRAT

Vídeo	Resumen (mm:ss)	Vídeo original (mm:ss)
OVIRAT_S_000200_00_000100_000171	00:29	01:10
VIRAT_S_010000_00_000000_000165	01:41	02:45
VIRAT_S_000001	03:35	11:29

Move detector elimina imágenes muy similares en las que apenas se ha producido movimiento. Por ejemplo, si en el fondo aparece un paso de cebra, y una persona se detiene a esperar delante de este, el algoritmo sólo almacena unos pocos fotogramas de la espera, esto es debido a que el algoritmo no registra el tiempo de espera del peatón, dado que no hay movimiento, lo que se traduce en una reducción aún mayor del tiempo del resumen.

Uno de los inconvenientes de este método es el tamaño final del resumen, el cual puede llegar a ser superior al tamaño del vídeo original. Esto es debido a que el resultado final es la unión de todos los fotogramas que alberguen movimiento, y si estos han sido extraídos en un formato de mejor calidad que el original, el resumen final necesitará más espacio de memoria que el vídeo original.

5 CONCLUSIONES

En este artículo se han revisado tres métodos diferentes para resumir vídeos automáticamente. Video2GIF, que trabaja con redes neuronales artificiales, Move Detector, que se basa en un algoritmo de detección de movimiento con fondo cambiante y Peaks Volume, script que analiza el audio del vídeo con el objetivo de encontrar los picos de volumen y resumir el vídeo en torno a estos.

La evaluación de los métodos Video2GIF y Peaks Volume se ha realizado sobre el dataset VSUMM, mediante el método de evaluación CUS. La evaluación de Move Detector se ha realizado sobre el dataset VIRAT, el cual contiene vídeos grabados por cámaras fijas.

A pesar de que el dataset VIRAT, con el que se ha evaluado el método Move Detector, no tiene fotogramas claves etiquetados manualmente y no se ha podido aplicar el método de evaluación CUS, se han realizado tres resúmenes en los que se ha capturado todo el movimiento y se han eliminado los fotogramas que carecían de este. El inconveniente de este método es el tamaño final de los resúmenes, el cual, debido a la calidad de los fotogramas extraídos, ha sido superior al tamaño del vídeo original.

El método Peaks Volume ha obtenido una buena puntuación media CUS, siendo menos efectivo en vídeos que contengan mucho ruido. Ha obtenido una puntuación de 0.538 y 1 en vídeos de documentales cortos, pero aún hay margen de mejora en la coherencia del audio final.

Por otro lado, el método Video2GIF ha conseguido los mejores resultados en vídeos que contienen una gran variedad de escenas cortas y que albergan acciones humanas, pero su puntuación es bastante menor cuando se trabaja con vídeos que contienen muchas escenas similares, pues siempre tiende a captar la misma variedad de acciones. Esto es debido a la configuración de la red, la cual se realizó en función a un entrenamiento realizado sobre el dataset UCF101, que contiene vídeos de 101 acciones humanas, y al entrenamiento de la red sobre el dataset creado por los autores de Video2GIF que permitió ajustar los pesos de la red. Es importante aplicar un entrenamiento ligado al objetivo final que se pretende conseguir.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido llevada a cabo en base al acuerdo entre la Universidad de León e INCIBE

(Instituto Nacional de Ciberseguridad de España) bajo la Adenda 22.

Referencias

- [1] Eliza, S., Avila, F. De, Paula, A., Lopes, B., Jr, L., & Albuquerque, A. De. (2011). VSUMM : A mechanism designed to produce static vídeo summaries and a novel evaluation method. *Pattern Recognition Letters*, 32(1), 56–68. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2010.08.004>
- [2] Furini, M., & Ghini, V. (2006). An audio-vídeo summarization scheme based on audio and vídeo analysis. *2006 3rd IEEE Consumer Communications and Networking Conference, CCNC 2006*, 2, 1209–1213. <https://doi.org/10.1109/CCNC.2006.1593230>
- [3] Godbehere, A. B., & Goldberg, K. (2014). Algorithms for visual tracking of visitors under variable-lighting conditions for a responsive audio art installation. *Controls and Art: Inquiries at the Intersection of the Subjective and the Objective*, 181–204. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03904-6_8
- [4] Gygli, M., & Gool, L. Van. (2015). Vídeo Summarization by Learning Submodular Mixtures of Objectives, 3090–3098. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298928>
- [5] Gygli, M., Song, Y., & Cao, L. (2016). Video2GIF: Automatic Generation of Animated GIFs from Vídeo. *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 1001–1009. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.114>
- [6] Jiang, W., Cotton, C., & Loui, A. C. (2011). Automatic consumer vídeo summarization by audio and visual analysis. *Proceedings - IEEE International Conference on Multimedia and Expo*. <https://doi.org/10.1109/ICME.2011.6011841>
- [7] Kaewtrakulpong, P., & Bowden, R. (2001). An Improved Adaptive Background Mixture Model for Real- time Tracking with Shadow Detection. *Advanced Video Based Surveillance Systems*, 1–5. <https://doi.org/10.1.1.12.3705>
- [8] Merialdo, Y. L. and B. (2012). Vídeo Summarization Based on Balanced AV-MMR. *MMM 2012, 18th International Conference on Multimedia Modeling*, 7131/2012. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-27355-1_35
- [9] Oh, S., Hoogs, A., Perera, A., Cuntoor, N., Chen, C. C., Lee, J. T., ... Desai, M. (2011). AVSS 2011 demo session: A large-scale benchmark dataset for event recognition in surveillance vídeo. *2011 8th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance, AVSS 2011*, (2), 527–528. <https://doi.org/10.1109/AVSS.2011.6027400>
- [10] Radev, D. R. (2004). LexRank : Graph-based Centrality as Saliency in Text Summarization. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 22, 457–479. Retrieved from <https://www.jair.org/media/1523/live-1523-2354-jair.pdf>
- [11] Rapantzikos, K., Evangelopoulos, G., Maragos, P., & Avrithis, Y. (2007). An audio-visual saliency model for movie summarization. *2007 IEEE 9Th International Workshop on Multimedia Signal Processing, MMSP 2007 - Proceedings*, 320–323. <https://doi.org/10.1109/MMSP.2007.4412882>
- [12] Song, Y., Vallmitjana, J., Stent, A., & Jaimes, A. (2015). TVSum: Summarizing web vídeos using titles. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 07–12–June, 5179–5187. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7299154>
- [13] Soomro, K., Zamir, A. R., & Shah, M. (2012). UCF101: A Dataset of 101 human actions classes from vídeos in the wild. *CoRR*, abs/1212.0(November), 1–7. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1212.0402>
- [14] Tran, D., Bourdev, L. D., Fergus, R., Torresani, L., & Paluri, M. (2015). Learning Spatiotemporal Features with 3D Convolutional Networks. *CoRR*, abs/1412.0. <https://doi.org/10.1007/s11263-012-0542-7>
- [15] Xu, Z., Yang, Y., & Hauptmann, A. G. (2015). A discriminative CNN vídeo representation for event detection. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 07–12–June, 1798–1807. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298789>
- [16] Zivkovic, Z. (2004). Improved adaptive Gaussian mixture model for background subtraction. *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition*, 2(2), 28–31 Vol.2. <https://doi.org/10.1109/ICPR.2004.1333992>

SIMULADOR PARA LA CREACIÓN DE MUNDOS VIRTUALES PARA LA ASISTENCIA A PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA EN SILLA DE RUEDAS

Carlos Sánchez Sánchez, María Cidoncha Jiménez, Emiliano Pérez, Inés Tejado, Blas M. Vinagre
Universidad de Extremadura, Escuela de Ingenierías Industriales, Avenida de Elvas, s/n, (06006) Badajoz
Email: {emilianoph,itejbal,bvinagre}@unex.es

Resumen

En los últimos años se han ido incorporando diferentes tecnologías al ámbito de la ingeniería de la rehabilitación con el objeto de desarrollar sistemas de asistencia a personas con movilidad reducida en silla de ruedas que se adecúen a sus necesidades y permitan mejorar su calidad de vida. La Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Extremadura cuenta con un simulador de movimiento, único en España, que tiene como principal objetivo el diseño y fabricación de este tipo de ayudas técnicas. Este artículo describe el proceso de integración de los equipos disponibles para la creación de mundos virtuales para la asistencia a personas con movilidad reducida en silla de ruedas para mejorar, en un futuro, su calidad de vida, así como para ayudar en el diseño de infraestructuras en ciudades más adecuadas a sus limitaciones. A modo de ilustración, se incluye una de las aplicaciones desarrolladas para esta aplicación.

Palabras Clave: ingeniería, rehabilitación, simulador, realidad virtual, discapacidad, silla de ruedas.

1 INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la ingeniería de la rehabilitación, se considera indispensable que los sistemas de asistencia para la movilidad se adapten a las necesidades del usuario. Con esta premisa, el diseño y la realización de pruebas que simulen situaciones reales que proporcionen indicadores para la adaptación al usuario de esas asistencias técnicas son primordiales para su éxito. Es por ello que desde hace años se persigue como desafío el desarrollo de métodos de evaluación de las capacidades motoras y cognitivas que faciliten el proceso de elección de los sistemas de ayuda técnica adecuados.

Recientemente, se han ido incorporando diferentes tecnologías al ámbito de la ingeniería de la

rehabilitación. Para el caso particular de personas con movilidad reducida en silla de ruedas, son varios los grupos de investigación que han estado trabajando en prototipos de simuladores de sillas de ruedas con el objetivo antes mencionado (consúltese, por ejemplo, [2-10, 12, 16], o las revisiones [1,15]).

Este artículo describe el proceso de integración de diversos equipos disponibles en la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Extremadura para la creación de mundos virtuales para la asistencia a personas con movilidad reducida en silla de ruedas. Conviene resaltar que con el objetivo final de este trabajo es, en un futuro, el diseño y la fabricación de ayudas técnicas que permitan mejorar la calidad de vida de este tipo de personas. Además se pretende que el sistema sirva de ayuda en la fase de diseño de las infraestructuras de edificios que permitan una mejor adaptación para los usuarios en silla de ruedas. Estos equipos fueron adquiridos e instalados en el ámbito del proyecto “Centro de Tecnificación del Deporte Paralímpico” (DEPATech).

El resto del artículo está estructurado como sigue. El apartado 2 describe los principales equipos del simulador. El apartado 3 está dedicado a los procesos de integración de la estación de trabajo con el sistema de captura óptico, la plataforma de movimiento y el sistema háptico, el casco de realidad virtual mediante Unity para la creación de los mundos virtuales. El apartado 4 muestra el proceso de integración mediante una de las escenas desarrolladas. Las conclusiones de este trabajo, así como líneas de trabajo futuro, se resumen en el apartado 5.

2 EL SIMULADOR

El simulador está integrado por los siguientes equipos (véase un esquema de cómo están relacionados en la Figura 1):

- una estación de trabajo;
- una interfaz con la silla de ruedas, formada por una plataforma de movimiento, otra háptica para la silla y elementos de acceso;

- sistemas de captura corporal óptico y guante de datos;
- dispositivos de visualización, en concreto, una pantalla 3D y un casco de realidad virtual.

A continuación, se dan algunos detalles de cada uno de ellos.



Figura 1: Equipos que integran el simulador

2.1 ESTACIÓN DE TRABAJO

La estación de trabajo es el componente principal del simulador, esencial para su funcionamiento, ya que hace posible la comunicación con todos los equipos, es decir, tanto el envío como la recepción de datos. La aplicación para la gestión del simulador se ha desarrollado en Unity, software que permite incorporar fácilmente modelos de mundos virtuales e interactuar con ellos [17]. Asimismo, este software permite el manejo de cualquier dispositivo hardware que tenga las correspondientes librerías de programación, gracias a la posibilidad de introducir scripts en lenguaje C#.

Es importante resaltar que la potencia gráfica de este PC limita el nivel de detalle o la complejidad de los mundos virtuales que se diseñen. Además, si se desea gestionar simultáneamente varias salidas de visualización (monitor, pantalla 3D y casco de realidad virtual) es recomendable que la tarjeta gráfica que lleve instalada tenga esa funcionalidad. En el simulador se utilizan simultáneamente dos tarjetas gráficas: Nvidia GTX970 y Nvidia Quadro K5200.

2.2 INTERFAZ CON LA SILLA DE RUEDAS

Como se ha comentado, la interfaz con la silla de ruedas está constituida por una plataforma de movimiento y un sistema háptico. Existen muchos tipos y modelos de sillas de ruedas. Dada la aplicación considerada en este trabajo, la silla de

ruedas utilizada es la deportiva modelo *All Court* de Quickie.

La plataforma de movimiento es una plataforma de seis grados de libertad que permite transmitir al usuario las aceleraciones a las que es sometido como efecto de los movimientos que se produzcan en el mundo virtual (véase la Figura 2(a)). También permite reproducir las diferentes inclinaciones del terreno del mundo virtual sobre el que se está desplazando el usuario.

La plataforma dispone de un sistema háptico formado por dos cilindros actuados por motores. Estos cilindros sirven como interfaz del sistema con la silla de ruedas. La silla debe colocarse de forma que las ruedas estén en contacto permanente con los cilindros. Éstos tienen una doble función. Por un lado, detectar la intención del movimiento del usuario (los cilindros se accionan cuando el usuario mueve las ruedas). Y por el otro, emular las condiciones de la superficie del mundo virtual con el movimiento de los rodillos. Es decir, en función de la inclinación y tipo de superficie del mundo virtual en el que se encuentre, el usuario puede incluso notar mayor o menor facilidad a la hora de mover las ruedas.

La estación de trabajo es la encargada de medir y procesar el movimiento de los rodillos, así como de generar la rotación a los rodillos que se corresponda con la que experimenta las ruedas de la silla de ruedas virtual. La comunicación entre la estación de trabajo y ambas plataformas se realiza a través de un router con conexión Gigabit Ethernet, utilizando el protocolo TCP. La interacción entre el mundo virtual y ambas plataformas se gestiona desde un script en Unity.

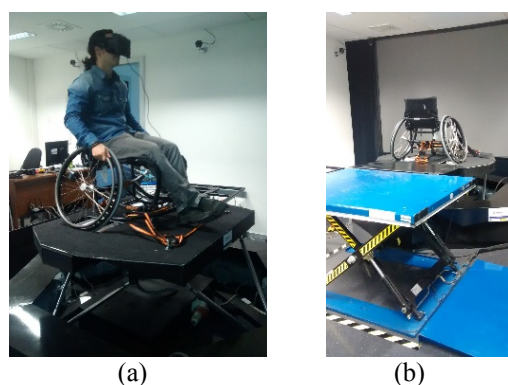


Figura 2: Plataforma de movimiento: (a) Usuario con casco de realidad virtual (b) Elementos de acceso a la plataforma

Cabe mencionar también que la plataforma dispone de un elevador automático con rampas para facilitar el acceso del usuario en silla de ruedas al simulador (Figura 2(b)).

2.3 SISTEMAS DE CAPTURA

El simulador dispone de un sistema para capturar los movimientos del usuario (véase la Figura 3), formado por un sistema óptico, para obtener las medidas del movimiento de todo el cuerpo de la marca Optitrack [13] y un guante de datos de 5DT, para registrar el movimiento de los dedos. Este sistema tiene una doble función: 1) registrar datos para su posterior procesamiento, análisis y estudio con objeto de diagnosticar posibles problemas o conductas erróneas en el usuario; y 2) mejorar la sensación de inmersión del usuario, ya que éste ve que su avatar se mueve de forma sincronizada con el movimiento de su cuerpo.

El software para el control del sistema de captura de Optitrack es Motive [14]. Este software permite la calibración y configuración del sistema y proporciona interfaces que permiten a su vez la captura y el procesamiento de datos 3D. Además, también permite realizar una emisión (streaming) de los datos capturados a través de la red, que ofrece, a su vez, la posibilidad de transferirlos al avatar del mundo virtual mediante Unity y C# Script.

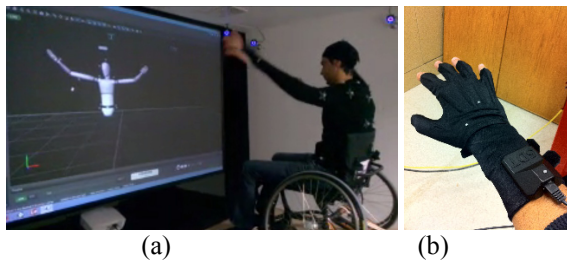


Figura 3: Sistemas de captura: (a) Sistema óptico de captura corporal (b) Guante de datos

2.4 SISTEMAS DE VISUALIZACIÓN

En lo relativo a la visualización del mundo virtual, el simulador dispone de una pantalla 3D de grandes dimensiones y un casco de realidad virtual Development Kit 2 (DK2) de Oculus Rift [11], mostrado en la Figura 4. El usuario de la silla de ruedas utiliza el casco para que, gracias a la inmersión, pueda desempeñar sus rutinas de movimiento como acostumbra a realizarlas en el mundo real. Por otro lado, la pantalla 3D permite al equipo técnico observar en todo momento cómo está actuando el usuario y, de esta manera, darle las órdenes pertinentes.



Figura 4: Casco de realidad virtual Development Kit 2 (DK2) de Oculus Rift con marcadores

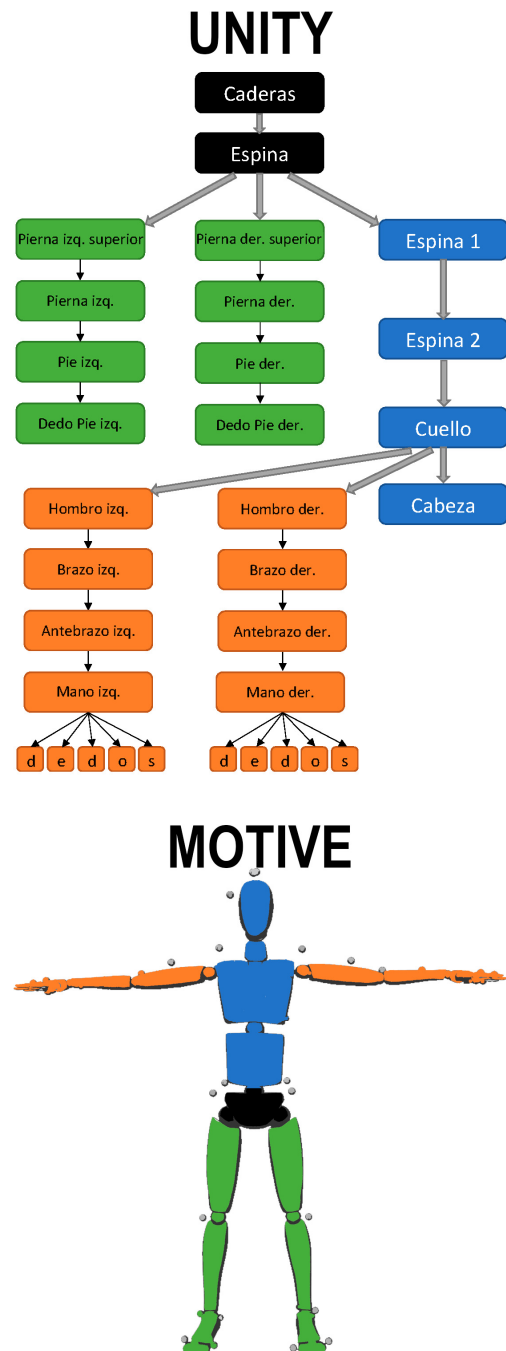


Figura 5: Correspondencia, representada con colores, entre la jerarquía del esqueleto del avatar de Unity y el esqueleto de Motive

3 INTEGRACIÓN DE EQUIPOS EN EL MUNDO VIRTUAL

Este apartado describe los procesos de integración de la estación de trabajo con el sistema de captura óptico, la plataforma de movimiento/sistema háptico y el casco de realidad virtual mediante Unity con objeto de crear los mundos virtuales para el simulador.

3.1 SISTEMA DE CAPTURA ÓPTICO

El proceso de integración del sistema de captura corporal óptico OptiTrack con Unity se ha realizado mediante el plugin que proporciona el fabricante [13] siguiendo los siguientes pasos:

1. Definición en Motive de un esqueleto, utilizando uno de los preconfigurados (*full body* de 27 marcadores).
2. Activación de la transmisión de datos en streaming desde Motive mediante protocolo Multicast.
3. Carga del plugin en Unity y asignación del script a un esqueleto de Unity que ha de tener una estructura jerárquica determinada, como la mostrada en la Figura 5.
4. Enlace entre el esqueleto Unity y el esqueleto Motive (se les debe asignar el mismo nombre).

3.1.1 Adaptación entre sistemas de referencia

Un paso fundamental para que la conexión entre ambos programas funcione es estudiar las relaciones entre los sistemas de coordenadas que usa cada uno y establecer un proceso de adaptación entre ambos.

El software de captura, dada la distribución física del sistema de cámaras, fija el origen del sistema de referencia en el centro del volumen de captura, Σ_{captura} (Figura 6(a)). Este punto se corresponde con la posición inicial del avatar, Σ_{avatar} , dentro del sistema de coordenadas de Unity (Figura 7).

En la aplicación que se plantea en este artículo ha de conseguirse que, una vez lanzada la simulación, si el usuario está en medio de la sala, en cualquier punto del volumen de captura de Optitrack, cuando se desplace físicamente sobre la silla de ruedas real, el avatar virtual que aparece en Unity ha de sentarse también justo encima de la silla virtual. Esto requiere de dos pasos fundamentales:

1. Cambio del origen de coordenadas del volumen de captura en Motive, situándolo en el centro de gravedad de la silla. Para ello, ha de medirse la distancia entre el centro de gravedad de las cámaras, Σ_{captura} , y el punto de la silla de ruedas real que coincide con el punto dónde se ubica en Unity el centro de gravedad de la silla de ruedas virtual, Σ_{silla} . Esta distancia es la se aplicará como offset al sistema de referencia de Motive (Figura 6(a)), con lo que el nuevo sistema de referencia estará ubicado donde se muestra en la Figura 6(b).
2. Como puede verse en la Figura 7(a), en Unity, inicialmente, avatar y silla de ruedas tienen sus respectivos centros de gravedad, Σ_{avatar} y Σ_{silla} ,

con respecto al sistema de referencia de Unity, Σ_{Unity} . En primer lugar, al avatar se le hará depender de la silla de ruedas, para que su sistema de referencia absoluto sea Σ_{silla} (Figura 7(b)). Seguidamente, se desplazará el avatar a su nuevo origen de coordenadas, dando lugar a que Σ_{avatar} y Σ_{silla} sean coincidentes (Figura 7(c)).

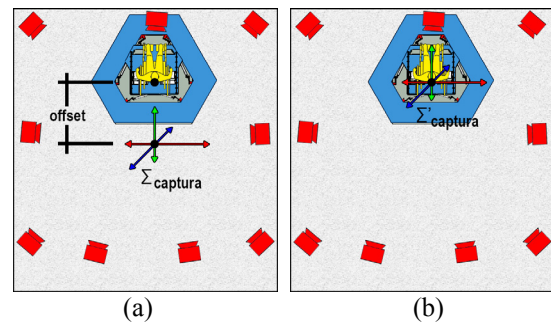


Figura 6: Desplazamiento del sistema de referencia en el programa de captura Motive: (a) Sistema de referencia inicial, Σ_{captura} , y distancia entre Σ_{captura} y el centro de gravedad de la silla de ruedas (Offset) (b) Nuevo sistema de referencia para el programa de captura, Σ'_{captura} (En rojo se representan las 9 cámaras del sistema de captura, en azul, la plataforma de movimiento y, en amarillo, el usuario sobre la silla de ruedas)

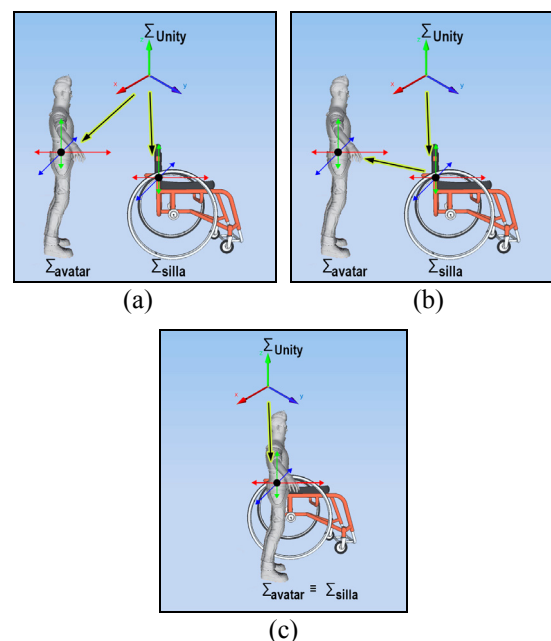


Figura 7: Asignación de sistemas de referencia en Unity: (a) Coordenadas del avatar, Σ_{avatar} , y de la silla de ruedas, Σ_{silla} , ubicados en sus centros de gravedad, con respecto al sistema de referencia de Unity, Σ_{Unity} (b) Asignación del centro de gravedad de la silla como sistema de referencia principal del avatar (c) Desplazamiento del avatar a su nuevo origen de coordenadas, Σ_{silla}

3.2 PLATAFORMA DE MOVIMIENTO Y SISTEMA HÁPTICO

A continuación, se va a describir el método para la integración de la plataforma y la silla de ruedas en el entorno de Unity.

3.2.1 Modelado de la plataforma en Unity

Unity incorpora un motor de físicas, basado en PhysX [18], que analiza en tiempo real las interacciones físicas entre los elementos debido al contacto entre ellos y la fuerza gravitatoria [17]. Para controlar la plataforma desde Unity, se ha desarrollado un script que permite la comunicación bidireccional entre Unity y la misma, de acuerdo con el esquema de la Figura 8, con dos funciones principales:

1. Detectar los movimientos que realiza la silla en Unity, así como las aceleraciones que experimente el modelo virtual y transmitirlos a la plataforma. A modo de ejemplo, si la silla está bajando una rampa de 30° de inclinación en Unity, la plataforma se inclinará 30° hacia delante en la realidad.
2. Capturar las órdenes de movimiento que da el usuario, es decir, el ángulo y la velocidad de giro de cada una de las ruedas, a través del sistema de rodillos de la plataforma. Estas órdenes son trasladadas automáticamente a la representación visual de Unity que, como es lógico, tiene directamente un efecto sobre el mundo que está procesando el motor de físicas de Unity.

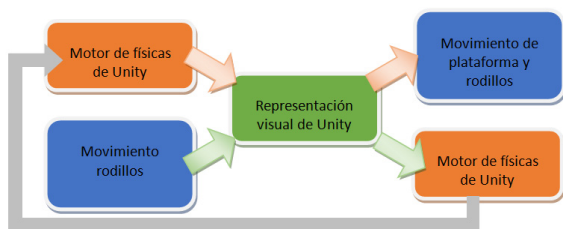


Figura 8: Esquema de la comunicación bidireccional entre la plataforma de movimiento y Unity

El script desarrollado permite la configuración de una serie de parámetros, tanto de la plataforma como del mundo virtual, entre los que cabe destacar:

- *'Platform Config File'*: archivo externo xml en el que se fijan los parámetros de configuración de la plataforma, tales como la velocidad de los motores.
- *'Right / Forward / Up Linear or Angular Scale'*: escala lineal o angular del eje derecho, delantero o superior, respectivamente.
- *'Factor 1'*: factor por el que se multiplica la velocidad de la silla cuando se desliza por una

pendiente. Valores positivos simulan una resistencia al movimiento baja, mientras que valores negativos, alta.

- *'Factor 2'*: factor por el que se multiplica la velocidad transmitida desde los dos rodillos hacia la silla virtual. Nótese que seleccionando valores negativos de este factor es posible invertir el sentido del movimiento, mientras que, si se elige un valor nulo, la silla virtual no se mueve.
- *'Factor 3'*: multiplicador de la velocidad de los rodillos. Para valores negativos, este factor puede usarse como factor de rozamiento de la silla sobre la superficie en la que se está desplazando. Al contrario, si se elige un valor positivo, podrá usarse como rozamiento negativo, como el que podría haber en el caso de una superficie helada.

Cabe resaltar que se ha creado un método para configurar la interacción entre el mundo virtual y el sistema de rodillos, mediante el cual se asignan diferentes valores a los factores 1, 2 y 3 para caracterizar diferentes tipos de superficies en el mundo virtual, tales como pista, hierba, arena y neutra, que básicamente se diferencian por tener diferentes coeficientes de rozamiento. Este método hace posible que, al paso de la silla de ruedas por cada tipo de suelo, el comportamiento de los rodillos emule el rozamiento de la silla con la superficie en cuestión. Por el momento, el ajuste de estos parámetros se ha hecho de forma empírica y con valores ilustrativos de suelos con grandes diferencias en sus coeficientes de rozamiento con el objeto de poder percibir las diferencias de comportamiento del sistema háptico.

Con respecto a la sincronización entre los movimientos virtuales y los reales de la plataforma, no se observan retardos en los tiempos de respuesta, incluso habiendo seleccionado una velocidad de los motores por debajo de la máxima en *'Platform Config File'*. Evidentemente, conviene señalar que, respecto a los movimientos de la plataforma, ésta simulará los de la silla de ruedas virtual con la limitación que imponen las dimensiones y relaciones entre los elementos mecánicos que la forman.

3.2.2 Modelado de la silla de ruedas en Unity

Para la representación de la silla de ruedas en Unity es necesario tener en cuenta dos cuestiones. Por un lado, es importante el modelado tridimensional de la silla de ruedas con sus correspondientes propiedades (dimensiones, materiales, centro de gravedad, material de contacto con el suelo), que tendrán su efecto dentro del motor de físicas de Unity. Por otro lado, cualquier diseño que se elija se ha de estructurar según el esquema básico representado en

la Figura 9. Como puede observarse, el modelo básicamente se divide en un chasis y las dos ruedas principales motrices. A cada uno de estos elementos se le ha de asociar la propiedad denominada *collider*, que hace que el objeto sea tenido en cuenta dentro del motor de físicas. En concreto, a cada *collider* se le ha de dar una forma y dimensiones, es decir, el *collider* define la envolvente del modelo 3D al que se le asocia, a partir de la cual se efectuarán los cálculos para las colisiones entre objetos.

En concreto, para las aplicaciones iniciales con este simulador se ha creado el modelo de la silla que se muestra en la Figura 10. Se ha definido un *collider* cúbico para el chasis y dos *colliders* específicos para ruedas de Unity.

3.3 CASCO DE REALIDAD VIRTUAL

Para el casco de realidad virtual, se ha instalado la versión 0.8 del kit de desarrollo de software (SDK en inglés) de Oculus Rift en la estación de trabajo. La integración del casco en Unity se ha hecho mediante la versión 1.13 del plugin proporcionado por Oculus Rift, disponible en [11].

Aunque este plugin soluciona perfectamente la integración del casco en Unity, conviene resaltar que para el posicionamiento absoluto del casco se ha decidido no utilizar la cámara externa que incorpora el Oculus DK2. Para la aplicación particular de este simulador, el rango de detección (distancia máxima con respecto a la cámara y ángulo de visión) que ofrece esta cámara es muy limitado. Por tanto, para el posicionamiento absoluto, se ha decidido utilizar el sistema de captura óptico. En concreto, se han adherido 6 marcadores ópticos al casco de realidad virtual, distribuidos asimétricamente, como se muestra en la Figura 4. Se decide emplear esta distribución con el objeto de que se pueda diferenciar perfectamente hacia dónde está mirando el usuario.

Los pasos seguidos para la integración del casco en Unity son los siguientes:

1. Carga del plugin de Oculus en la escena de Unity.
2. Cambio de la versión de DirectX a DirectX11 en las propiedades del proyecto de Unity, al tratarse de un casco con cierta antigüedad.
3. Asignación del script del controlador del casco a la cabeza del avatar.
4. Desactivación de la funcionalidad de posicionamiento absoluto.
5. Creación en Motive de un sólido rígido definido por los 6 marcadores adheridos al casco.
6. Activación de la transmisión de datos en streaming desde Motive.

7. Carga del plugin de Optitrack en Unity y asignación del script de sólido rígido a la cabeza del avatar.
8. Conexión del sólido de Unity con el sólido de Motive (se les debe asignar el mismo nombre).
9. Comprobación del seguimiento y visualización con el casco.



Figura 9: Estructura básica del modelo de la silla de ruedas en Unity



Figura 10: Modelo 3D de la silla de ruedas empleada en la aplicación desarrollada

4 EJEMPLO DE MUNDO VIRTUAL DESARROLLADO

En este apartado está dedicado a la aplicación que se ha desarrollado para el simulador a modo de ejemplo.

El ejemplo desarrollado se trata de una aplicación básica que resuelve el problema de la integración de todos los dispositivos del simulador y que puede servir como base para el diseño de entornos más complejos.

En primer lugar, se ha decidido añadir la funcionalidad de poder ejecutar la simulación con o sin captura de movimiento óptica y con pantalla o casco de realidad virtual, tal y como puede apreciarse en el menú inicial que aparece al lanzarse la aplicación, mostrado en la Figura 11.

Como se ha descrito anteriormente, el funcionamiento del simulador requiere la ejecución simultánea del software de captura óptico Motive y

de la simulación compilada a partir de Unity. La Figura 12 muestra una captura realizada durante la ejecución del simulador. En la Figura 12(a), puede verse cómo un usuario con el traje de captura y el casco de realidad virtual maneja el simulador, es decir, interacciona con la silla de ruedas real. Y en la Figura 12(b) y (c) se representa lo que ve el usuario en el casco de realidad virtual y el software Motive mientras captura los movimientos del usuario, respectivamente.

La aplicación básica que se ha diseñado se trata de un entorno pequeño de una ciudad con algunas calles y una pista de pruebas. La pista consta de diversos obstáculos y rampas de subida y bajada. Además, en una sección de la pista, cuyo suelo tiene un coeficiente de rozamiento, se han introducido otros 3 tipos de suelo (Figura 13), con coeficientes de rozamiento dispares, para probar el efecto del tipo de suelo sobre los rodillos del simulador.

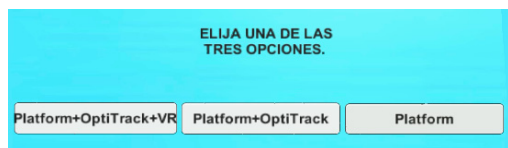


Figura 11: Menú principal de la aplicación desarrollada

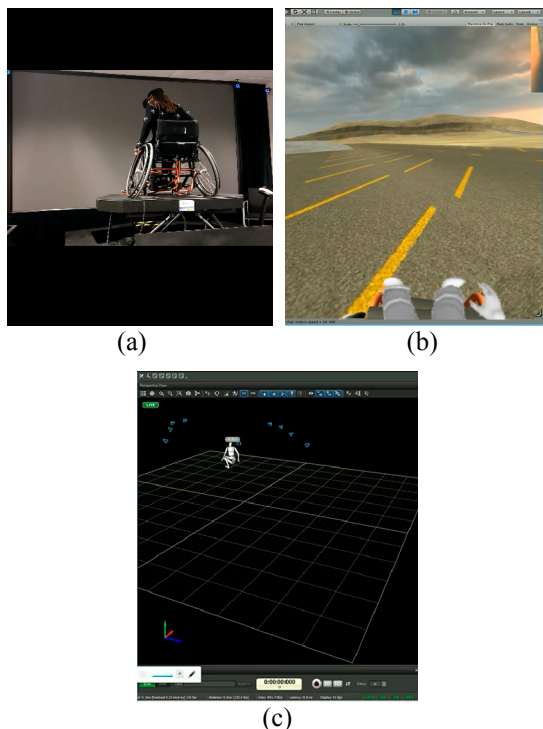


Figura 12: Simulador de movimiento en funcionamiento: (a) Usuario sobre la silla de ruedas del simulador con el traje de captura y casco de realidad virtual (b) Perspectiva del usuario del mundo virtual (c) Software Motive capturando datos

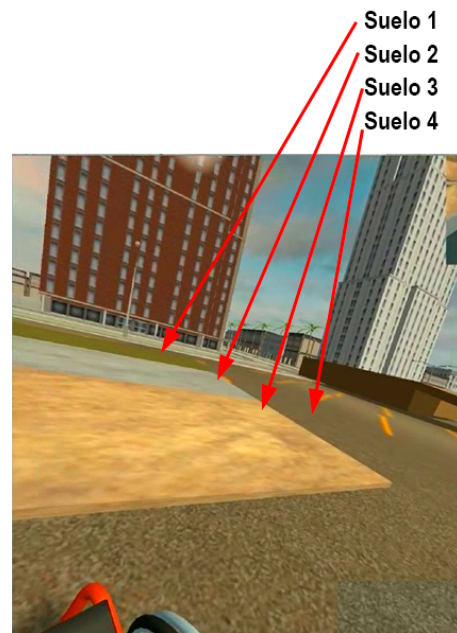


Figura 13: Diferentes tipos de suelo modelados en la aplicación desarrollada para el simulador

5 CONCLUSIONES

Este artículo ha descrito el proceso de integración de equipos de un simulador de movimientos para la asistencia a personas con movilidad reducida en silla de ruedas con el objeto de, en un futuro, mejorar su calidad de vida. En esencia, el simulador consta de una plataforma de movimiento con un sistema háptico de rodillos, un sistema de captura de movimientos y un casco de realidad virtual.

Se ha desarrollado una aplicación básica simple para el uso simultáneo de esas tecnologías. En esta aplicación se han modelado empíricamente diferentes tipos de suelo que afectan a la experiencia del usuario que se desplaza con la silla de ruedas sobre esos suelos virtualmente.

Como trabajos futuros se plantean los siguientes: 1) pruebas de rendimiento de las comunicaciones entre la estación de trabajo y el resto de equipos; 2) comprobación de las diferencias entre las transformaciones del mundo virtual y las aplicadas a la plataforma de movimiento; 3) creación de una tabla que sirva para relacionar las condiciones físicas de superficies con los valores de los parámetros 'Factor 1', 'Factor 2' y 'Factor 3' del script desarrollado y que permitan simular de forma precisa el rozamiento con esas superficies; y 4) integración de un guante de datos en el mundo virtual.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por Fondos FEDER (Programa Operativo FEDER de Extremadura 2014-2020), a través de la Ayuda a Grupos de la Junta de Extremadura con número de expediente GR15178, y por el Ministerio de Economía y Competitividad, a través del proyecto con referencia DPI2016-80547-R.

Parte del equipamiento utilizado en este trabajo fue adquirido gracias al Programa Operativo FEDER de I+D+i por y para el Beneficio de las Empresas-Fondo Tecnológico 2007-2013 del Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto "Centro de Tecnificación del Deporte Paralímpico" (DEPATech).

Referencias

- [1] Abellard, P., Randria, I., Abellard, A., Ben Khelifa, M. M., Ramanantsizehena, P., (2010) "Electric Wheelchair Navigation Simulators: why, when, how?", *Mechatronic Systems Applications*, A. M. Donato Di Paola and G. Cicirelli (Ed.), InTech.
- [2] Advanced Multimodal Room for Interaction in Virtual Reality. Online: <https://www.lst.tfo.upm.es/virtual-reality-room/>
Consultado el día: 04/06/2016
- [3] Crichlow, L. R., Fernie, G. R., Campos, J. L., Grant, P. R., (2011) "A Full Motion Manual Wheelchair Simulator For Rehabilitation Research", *Proc. 2011 RESNA/ICTA Conference - Advancing Rehabilitation Technologies for an Aging Society*.
- [4] Fernández-Panadero, C., Cruz Barquero, V., Morán Núñez, D., Delgado Kloos, C., (2014) "PhyMEL-WS: Physically Experiencing the Virtual World. Insights into Mixed Reality and Flow State on Board a Wheelchair Simulator", *Journal of Universal Computer Science*, 20(12):1629-1648.
- [5] Fernández-Panadero, C., Cruz Barquero, V., Morán Núñez, D., Delgado Kloos, C., (2013) "PhyMEL-WS Wheelchair Simulator: A Preliminary Study to Increase Awareness about the Problems of Living the City in a Wheelchair", *Proc. 3rd European Immersive Education Summit*, pp. 210-221, UK.
- [6] Grant, M., (2003) "Wheelchair Simulation in Virtual Reality". Online: <https://pdfs.semanticscholar.org/a500/757b5624a69d9dd2901110554102a5109a70.pdf>
Consultado el día: 04/06/2016
- [7] Harrison, C. S. and Grant, P. M. and Conway, B. A., (2010) "Enhancement of a virtual reality wheelchair simulator to include qualitative and quantitative performance metrics", *Assistive Technology*, 22(1): 20-31.
- [8] John, N. W., Pop, S. R., Day, T. W., Ritsos, P. D., Headleand, C. J., (2017) "The Implementation and Validation of a Virtual Environment for Training Powered Wheelchair Manoeuvres", *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, In Press.
- [9] Mahajan, H. P., Dicianno, B. E., Cooper, R. A., Ding, D., (2013) "Assessment of wheelchair driving performance in a virtual reality-based simulator", *The Journal of Spinal Cord Medicine*, 36(4):322-332.
- [10] Niniss, H., Inoue, T., (2006) "Electric Wheelchair Simulator for Rehabilitation of Persons with Motor Disability", *Proc. National Rehabilitation Centre for Persons with Disabilities Conference*, Japón.
- [11] Oculus Rift. Online: <https://www.oculus.com/rift/>
Consultado el día: 04/06/2016
- [12] Onyango, S. O., Hamam, Y., Djouani, K., Daachi, B., Steyn, N., (2016) "A Driving Behaviour Model of Electrical Wheelchair Users", *Computational Intelligence and Neuroscience*, 7189267.
- [13] OptiTrack. Online: <http://optitrack.com>
Consultado el día: 04/06/2016
- [14] OptiTrack. Motive documentation. Online: http://wiki.optitrack.com/index.php?title=Motive_Documentation
Consultado el día: 04/06/2016
- [15] Pithon, T., Weiss, T., Richir, S., Klinger, E., (2009) "Wheelchair simulators: A review", *Technology and Disability*, 21(1):1-10.
- [16] Steyn, N., Hamam, Y., Monacelli, E., Djouani, K., (2015) "Modelling and design of an augmented reality differential drive mobility aid in an enabled environment", *Simulation Modelling Practice and Theory*, 51:115-134.
- [17] Unity. Online: <https://unity3d.com/es>
Consultado el día: 04/06/2016
- [18] Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/PhysX>
Consultado el día: 04/06/2016

Calibración Extrínseca de un Conjunto de Cámaras RGB-D sobre un Robot Móvil

David Zúñiga-Noël, Rubén Gómez Ojeda, Francisco-Ángel Moreno, Javier González Jiménez
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, grupo MAPIR, Universidad de Málaga
Instituto de Investigación Biomédica de Málaga (IBIMA)
{dzuniga,rubengooj,famorenno,javierngonzalez}@uma.es

Resumen

La aparición de las cámaras RGB-D como sensores robóticos de bajo coste ha supuesto la inclusión habitual de varios de estos dispositivos en una creciente cantidad de vehículos y robots. En estos casos, la calibración precisa de las transformaciones espaciales existentes entre las cámaras del mismo robot es de capital importancia a la hora de obtener medidas fiables del entorno. Este artículo evalúa el método de calibración con fórmula cerrada descrito en [7] y lo extiende con una propuesta alternativa basada en un método iterativo y una extensión robusta de este último en dos escenarios: i) un entorno simulado con cambios en el nivel de ruido de las observaciones, en el número de observaciones obtenidas, en la proporción de outliers y en las posiciones relativas de las cámaras, y ii) una configuración particular de 3 cámaras RGB-D sobre un robot real. Los resultados de la evaluación muestran una mayor precisión para nuestra propuesta iterativa robusta en todos los escenarios analizados. El código fuente de la implementación de estos métodos en C++ se proporciona para su uso público.

Palabras clave: Calibración extrínseca, cámaras RGB-D, robots móviles.

1. Introducción

La aparición de las cámaras RGB-D ha supuesto una revolución en el mundo de los sensores robóticos debido a su bajo coste y la gran cantidad de información que pueden proporcionar sobre el entorno, combinando una cámara estándar RGB con una cámara especial (principalmente de proyección de patrones de infrarrojos o de tiempo de vuelo) que captura la información de profundidad de la escena.

Siendo una de las principales limitaciones de este tipo de dispositivos su relativamente bajo campo de visión ($\sim 60^\circ$ HFoV), es habitual encontrar sistemas que integran varias cámaras RGB-D funcionando simultáneamente sobre un mismo robot o vehículo [4, 13], aumentando de esta forma su rango de observación. Este tipo de configuraciones

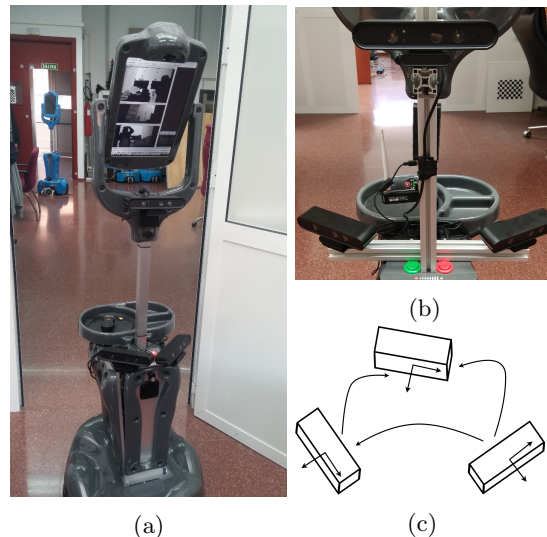


Figura 1: Figura con el robot *Giraff* y el conjunto de sensores RGB-D con los que se han llevado a cabo los experimentos (Figura 1a). En la Figura 1b se puede observar en detalle las tres cámaras montadas en el sensor, mientras que en la Figura 1c se puede observar el esquema del conjunto de cámaras con sus transformaciones relativas.

multi-cámara implican un proceso de calibración extrínseca de las mismas que determina su posición y orientación dentro de un sistema de referencia común elegido arbitrariamente al que se transforman las medidas tomadas por todas las cámaras, generando una observación precisa y coherente del entorno.

Es importante remarcar que esta calibración extrínseca de las configuraciones multi-cámara es independiente del proceso de calibración intrínseco (e.g. estimación de la distancia focal, parámetros de distorsión, etc.) de cada una de ellas, así como de la estimación de la transformación espacial existente entre la cámara RGB y de distancia que componen cada dispositivo individual [18, 6, 8]. Además, las cámaras RGB-D sufren de la aparición de errores en las medidas de rango en función de la distancia de los objetos medidos al centro óptico de la cámara de profundidad, requiriendo de un tratamiento especial para compensar dichos errores y obtener medidas fiables [14, 5].

Estos procedimientos de calibración son de capital importancia para obtener medidas precisas del entorno, reduciendo de esta manera los errores sistemáticos en las observaciones obtenidas.

En este artículo, sin embargo, asumimos que las cámaras ya se encuentran calibradas individualmente y nos centramos principalmente en la estimación robusta de las transformaciones geométricas existentes entre un conjunto de sensores RGB-D que forman un sólido rígido. Para ello extendemos el método propuesto en [7], que implementa una formulación cerrada para el caso específico de dos cámaras. Dicho método está basado en la observación de superficies planas desde diferentes perspectivas y tiene la ventaja de que puede ser aplicado de forma sencilla sin necesidad de un patrón de calibración pre-construido, ya que, habitualmente, los entornos creados por seres humanos presentan dichas superficies. De esta forma, el proceso de re-calibración puede ejecutarse en cualquier momento y prácticamente sin intervención humana. Sin embargo, la formulación cerrada propuesta se muestra muy sensible ante la presencia de medidas afectadas por mucho ruido y/o observaciones erróneas (*outliers*), por lo que se hace necesario el desarrollo de un método que pueda hacer frente de mejor manera a estas situaciones habituales en los experimentos con datos reales.

Así, las contribuciones de este trabajo se concretan en:

- La elaboración de un estudio de los resultados obtenidos por el método propuesto en dicho artículo, tanto en simulación como en un robot real.
- La propuesta de un método alternativo basado en una formulación iterativa y una versión robusta del mismo que obtiene mejores resultados incluso en presencia de *outliers* y/o medidas muy ruidosas.
- La publicación del código fuente en C++ que implementa los tres métodos evaluados.

Para la validación de los resultados, se han desarrollado dos tipos de pruebas (ver sección 5): i) en un entorno simulado en el que se ha analizado el comportamiento de los distintos sistemas propuestos e implementados ante distintos niveles de ruido, número de observaciones, proporción de *outliers* en las observaciones y posiciones relativas de los sensores y ii) con una configuración de tres cámaras sobre un robot real donde se han estimado las transformaciones relativas entre cada par de cámaras y se han comparado con las obtenidas por la composición de las otras dos transformaciones. En todos los casos se ha demostrado que el

método iterativo robusto presenta una mayor precisión a la hora de determinar la posición relativa entre cámaras.

Por último, el código fuente de las librerías de C++ desarrolladas en este artículo, junto con vídeos ilustrativos y demás material adicional, podrá ser encontrado en el siguiente enlace: <http://mapir.uma.es/>

2. Trabajos Relacionados

La necesidad de métodos de calibración extrínseca de sensores ha dado lugar a diversas propuestas, tanto genéricas [15] como para sensores específicos [8]. La mayoría de estos métodos de calibración pueden clasificarse en dos grandes grupos: *basados en el movimiento* o *basados en la observación simultánea de características*.

Los métodos *basados en movimiento* [15, 3, 19] consisten básicamente en estimar la relación espacial entre los sensores a partir de la trayectoria calculada para cada sensor independientemente. Si bien se trata de un enfoque genérico, puesto que únicamente requiere un algoritmo de odometría, puede ser una solución poco práctica. Una de las principales complicaciones que se presentan a la hora de aplicar estos métodos de manera automática es que el resultado de la calibración depende directamente de la precisión del algoritmo de odometría en que se base. Además, la precisión puede variar de un entorno a otro y según la cantidad de elementos dinámicos o estáticos presentes.

Por el contrario, los *métodos basados en la observación simultánea de características* [10, 17, 8] consisten en detectar correspondencias entre elementos del entorno percibidos simultáneamente por los sensores, a partir de las cuales se estima la relación espacial entre dichos sensores. En general, estos métodos, a diferencia de los basados en movimiento, necesitan de una región de observación común a los sensores para poder establecer las correspondencias. Además, las características del entorno en base a las que se formulan estas soluciones deben aparecer con suficiente frecuencia para poder realizar el procedimiento de calibración de manera autónoma en un robot móvil.

El método [7] en el que se basa este trabajo entraría dentro de esta última categoría, empleando regiones planas como características sobre las que establecer las correspondencias. Este planteamiento, en caso de que las regiones sean suficientemente grandes, relaja la restricción de *observación simultánea* a la observación de un mismo plano, pero no necesariamente la misma región del plano. Esta característica permite minimizar la región de solape entre los sensores, maximizando de esta for-

ma el campo de visión. Además, la abundancia de regiones planas en entornos creados por el ser humano permite asegurar la presencia de las características en el entorno de trabajo necesarias para llevar a cabo el proceso de calibración.

Sin embargo, como ya hemos comentado, el planteamiento original [7] se ve afectado considerablemente por el ruido de las medidas y la presencia de *outliers* en las observaciones. Para mitigar estos efectos, en este trabajo se aplican técnicas de optimización robusta que permiten obtener mayor precisión en estas condiciones.

3. El Robot *Giraff*

Giraff es un robot móvil diseñado con fines asistenciales que está basado en una plataforma robótica con un PC a bordo y una pantalla táctil ajustable en altura y orientación que se utiliza como principal interfaz de interacción con el usuario (ver Figura 1a).

3.1. Hardware

La plataforma robótica consta de dos ruedas motoras y dos ruedas libres situadas una en la parte delantera y otra en la trasera con el fin de mejorar la estabilidad del movimiento y permitir que el robot gire sobre sí mismo. El conjunto de sensores del robot se compone de una cámara web de 5 Mpx situada en la parte superior de la pantalla táctil con la que se puede transmitir video a un usuario remoto o detectar y reconocer tanto personas como objetos. En la parte delantera del robot se han colocado dos cámaras RGB-D con el objetivo de ampliar el campo de visión del robot para el mapeado, la localización y la navegación. La posición de las cámaras se ha escogido de manera que las vistas de ambos sensores no se solapen pero que tengan una visión del suelo en todo momento. Otra cámara RGB-D situada a una altura mayor se utilizará para el reconocimiento de gestos, como método alternativo de interacción entre el usuario y el robot.

3.2. Software

El PC de a bordo de *Giraff* está basado en Linux Ubuntu 16.04 e integra un entorno ROS donde se implementan las funcionalidades y los comportamientos del robot: navegación autónoma, detección y reconocimiento de caras y gestos, análisis y síntesis de voz, etc. Dentro de esta arquitectura se integra el módulo de auto-calibración que implementa el método descrito en este artículo.

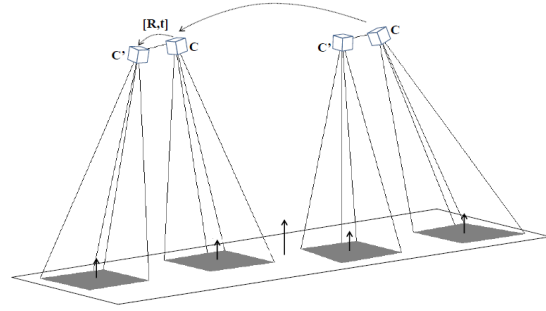


Figura 2: Figura adaptada de [7] con el esquema de calibración empleado en este trabajo, en el que dos sensores RGB-D unidos rígidamente por una transformación $T = [R|t]$ observan en distintas configuraciones el mismo plano.

4. Calibración Extrínseca de Cámaras RGB-D

En esta sección se describen los algoritmos de calibración desarrollados en este artículo, tras introducir brevemente el problema que vamos a resolver.

4.1. Planteamiento del Problema

Esencialmente, el objetivo es encontrar la transformación geométrica relativa $T = [R|t] \in SE(3)$ entre dos sensores RGB-D, suponiendo que están unidos rígidamente (ver Figura 2). Para ello, se obtendrá una serie de N distintas observaciones de uno o más planos, dadas por su vector normal \mathbf{n}_i en el sistema de referencia de cada cámara y la distancia desde el centro óptico de éstas al plano d_i . Una vez obtenidas las observaciones, suponiendo que cumplen la condición de observabilidad, dada por:

$$\text{rango}\left(\sum_{i=1}^N \mathbf{n}_i \mathbf{n}_i^T\right) = 3 \quad (1)$$

se puede encontrar la solución óptima al problema (esto es, estimar la pose relativa entre los diferentes sensores) de diferentes maneras. Para que se cumpla la condición de observabilidad, al menos 3 observaciones independientes son necesarias [7]

4.2. Solución en Forma Cerrada

En este apartado, se describirá someramente la solución en forma cerrada al problema planteado presentada previamente en [7] que desacopla la estimación de la traslación con respecto de la rotación, comenzando por la estimación de la rotación \mathbf{R} . Para ello, el estimador de máxima verosimilitud viene dado por la maximización de la verosimilitud logarítmica, asumiendo que los errores

siguen una distribución normal, para las N observaciones:

$$\operatorname{argmax}_{\mathbf{R}} \left\{ \log \prod_{i=1}^N p(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}'_i | \mathbf{R}) \right\} \quad (2)$$

donde las primas en los superíndices denotan observaciones del segundo sensor. Entonces, gracias a la hipótesis de que los errores son Gaussianos, podemos llegar a la siguiente expresión:

$$\operatorname{argmin}_{\mathbf{R}} \sum_{i=1}^N \omega_i \|\mathbf{n}_i - \mathbf{R} \mathbf{n}'_i\|^2 \quad (3)$$

observando que la derivación del estimador de máxima verosimilitud coincide con el problema de mínimos cuadrados justamente introducido. La ecuación anterior es también conocida como problema ortogonal de Procrustes y su solución en forma cerrada es conocida [1, 16].

En el caso de la traslación, es posible llegar fácilmente a la siguiente expresión:

$$\operatorname{argmin}_{\mathbf{t}} \left\{ \omega_i (d_i - d'_i + \mathbf{t} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{n}'_i)^2 \right\} \quad (4)$$

que, al igual que en el caso anterior, corresponde el estimador de máxima verosimilitud:

$$\operatorname{argmax}_{\mathbf{t}} \left\{ \log \prod_{i=1}^N p(\mathbf{n}_i, \mathbf{n}'_i, d_i, d'_i, \mathbf{R} | \mathbf{t}) \right\} \quad (5)$$

con el problema de mínimos cuadrados presentado, cuya solución es sencilla de recuperar (consultar [7] para más detalles).

4.3. Solución con Mínimos Cuadrados

El problema de la solución anteriormente presentada, llega en presencia de observaciones muy ruidosas y/o *outliers*, ya que es muy sensible a estos fenómenos. Por ello, en este artículo proponemos su resolución de forma robusta mediante los problemas de mínimos cuadrados planteados en (3) y (4). Escribiendo dichas ecuaciones en una misma expresión de forma matricial, se puede llegar a:

$$\operatorname{argmin}_{\xi} \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{n}_i \\ d_i - d'_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ -\mathbf{t}^T \mathbf{R} \end{bmatrix} \mathbf{n}'_i \right\}^2 \quad (6)$$

donde $\xi \in \mathfrak{se}(3)$ es el vector que define la transformación relativa en la variedad 6-dimensional $\mathfrak{se}(3)$, conocida como álgebra de Lie, del espacio de las transformaciones Euclídeas de forma que se cumple $\mathbf{T}(\xi) \in SE(3)$.

Si se observa la segunda parte de la expresión (6), es posible relacionarla con la traspuesta de la inversa de la matriz de transformación 3×4 existente

entre los dos sensores, esto es:

$$\xi^* = \operatorname{argmin}_{\xi} \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{n}_i \\ d_i - d'_i \end{bmatrix} - \mathbf{T}(\xi)^{-T} \mathbf{n}'_i \right\}^2 \quad (7)$$

donde ξ^* se refiere al valor óptimo estimado. En lugar de resolver la expresión anterior de forma cerrada, se va a resolver el problema mediante el algoritmo iterativo Levenberg-Marquardt [11] de común uso en robótica [9]. Dicho algoritmo requiere de la estimación de la matriz Jacobiana del error minimizado, o dicho de otro modo:

$$\mathbf{J}(\xi) = \frac{\partial \mathbf{e}_i(\xi \oplus \Delta \xi)}{\partial \Delta \xi} \Big|_{\Delta \xi=0} \quad (8)$$

donde el operador \oplus es la composición de poses y el error \mathbf{e}_i se refiere a:

$$\mathbf{e}_i(\xi) = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_i \\ d_i - d'_i \end{bmatrix} - \mathbf{T}(\xi)^{-T} \mathbf{n}'_i \quad (9)$$

tras lo cual se puede obtener el valor óptimo de la transformación relativa entre los dos sensores ξ^* . Para mayor detalle en la matemática relacionada con la geometría Euclídea recomendamos al lector consultar [2].

Por último, similarmente al método presentado en [12], se puede mejorar el comportamiento de la solución (7) ante observaciones ruidosas y/o *outliers*. Para ello, en lugar de utilizar la norma Euclídea, muy sensible a los grandes errores introducidos por las observaciones ruidosas, se ha utilizado la siguiente función robusta:

$$\xi^* = \operatorname{argmin}_{\xi} \rho(\|\mathbf{e}_i(\xi)\|^2) \quad (10)$$

donde $\rho(s) = \log(1 + s)$. En consecuencia, la matriz Jacobiana en (8) puede ser expresada como:

$$\mathbf{J}(\xi) = \frac{\partial \rho(\|\mathbf{e}_i(\xi \oplus \Delta \xi)\|^2)}{\partial \mathbf{e}_i(\xi \oplus \Delta \xi)} \frac{\partial \mathbf{e}_i(\xi \oplus \Delta \xi)}{\partial \Delta \xi} \Big|_{\Delta \xi=0} \quad (11)$$

que se puede relacionar fácilmente con el Jacobiano estimado anteriormente en (8).

5. Experimentos

Con el objetivo de analizar y comparar la solución original con las modificaciones propuestas en este trabajo, se ha llevado a cabo una serie de experimentos empleando tanto datos simulados (Sección 5.1) como datos reales (Sección 5.2) obtenidos mediante cámaras RGB-D montadas sobre el robot *Giraff*.

5.1. Entorno Simulado

Para la evaluación con datos simulados, se ha generado un conjunto de $N = 100$ transformaciones conocidas $T \in SE(3)$ entre los dos sensores, variando la traslación en el rango $[0.5, 1.5]$ m y la rotación en el rango $[-45, 45]^\circ$, ambos en el álgebra de Lie $\mathfrak{se}(3)$. Las observaciones en el espacio se han obtenido distribuyendo uniformemente los valores de traslación en ± 3 m y rotación en $\pm 180^\circ$, para uno de los sensores, de forma que se cumpla la condición de observabilidad (1).

Para evaluar el funcionamiento del algoritmo presentado ante el máximo número de fenómenos posibles en casos reales, se han simulado variaciones en los siguientes parámetros:

- Número de observaciones de planos N_{obs} .
- Nivel de ruido del sensor K_σ .
- Porcentaje de *outliers* R_{out} ,

en los rangos presentados en las Figuras 3, 4 y 5. Cada experimento, dada una configuración de sensores, se ha repetido un número de 100 veces dando lugar a un total de 10000 simulaciones para cada configuración de parámetros $\{N_{obs}, K_\sigma, R_{out}\}$, teniendo en cuenta que los parámetros por defecto son $N_{obs} = 100$, $K_\sigma = 1$, y $R_{out} = 10\%$.

En el caso del ruido de sensor, se ha considerado a éste como Gaussiano, cuyo nivel varía en función de K_σ de la siguiente manera:

$$\mathbf{n} \sim \mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}_n, K_\sigma \Sigma_n), \quad d \sim \mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}_d, K_\sigma \sigma_d^2) \quad (12)$$

donde $\boldsymbol{\mu}_n$ y $\boldsymbol{\mu}_d$ son los parámetros medios de observación del plano y Σ_n y σ_d son, respectivamente, estimaciones de la matriz de covarianza y desviación típica asociadas a los parámetros, empleando para ello valores representativos obtenidos empíricamente.

Los *outliers*, por otra parte, se han simulado introduciendo observaciones sin relación *a priori* con los parámetros de calibración extrínseca de los sensores. Para ello, se han sustituido los parámetros de una de las observaciones que forman cada correspondencia con parámetros de un plano extraídos de una distribución uniforme en todo el espacio de posibles observaciones considerado durante la simulación.

Para evaluar los algoritmos presentados en este trabajo, se ha empleado la distancia en la variedad 6-dimensional $\mathfrak{se}(3)$ entre las pose estimada y real, $\boldsymbol{\xi}^*, \boldsymbol{\xi}_r \in \mathfrak{se}(3)$ respectivamente, esto es:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} = \boldsymbol{\xi}^* \ominus \boldsymbol{\xi}_r = \log \left(\exp(\boldsymbol{\xi}^*)^{-1} \cdot \exp(\boldsymbol{\xi}_r) \right) \quad (13)$$

donde $\boldsymbol{\tau}$ y $\boldsymbol{\omega}$ son respectivamente las partes de traslación y rotación del vector $\boldsymbol{\varepsilon} \in \mathfrak{se}(3)$, y las funciones $\exp : \mathfrak{se}(3) \mapsto SE(3)$ y $\log : SE(3) \mapsto \mathfrak{se}(3)$ se encargan de relacionar el álgebra de Lie $\mathfrak{se}(3)$ y el espacio Euclídeo $SE(3)$.

En la Figura 3 se muestran los errores relativos tanto en rotación como en traslación (relativos a la transformación real; en tanto por uno) para un número variable de observaciones N_{obs} . En la gráfica se observa una ligera mejora en la precisión del algoritmo Levenberg-Marquardt robusto (LM-R) con respecto a la solución en forma cerrada (FC). La tendencia de los errores se vuelve asintótica a medida que aumenta el número de observaciones, esto es, a partir de un número de observaciones deja de ser beneficioso introducir nuevas medidas al estar incurriendo en un coste computacional más elevado para una mejora marginal en la precisión.

En cambio, en la Figura 4 se representan los errores relativos para un diferentes niveles de ruido K_σ , donde podemos observar que la solución con peor comportamiento es FC, seguida de LM y, de nuevo, la solución con mejor precisión vuelve a ser LM-R. Además, se puede observar como la solución FC empeora más que las que emplean Levenberg-Marquardt (LM y LM-R) a medida que aumenta el nivel de ruido en el sensor.

Por último, la Figura 5 presenta los errores para un porcentaje variable de *outliers*. En esta gráfica se puede observar de forma intuitiva cómo los algoritmos que no emplean ningún método para mejorar su robustez empeoran su comportamiento dramáticamente en función de la presencia de *outliers*, mientras que el método Levenberg-Marquardt robusto (LM-R) es capaz de realizar la calibración con un error entorno al 10%, tanto en traslación como en rotación, para un nivel de *outliers* del 50%.

5.2. Sobre el Robot *Giraff*

Finalmente, se ha evaluado el funcionamiento de los métodos analizados mediante un experimento en el cual se calibra extrínsecamente un conjunto de tres cámaras RGB-D montado sobre la plataforma robótica *Giraff* (ver Figura 1). Dicho experimento se llevó a cabo en un entorno de oficina, en el que se ha movido al robot de forma manual tomando como planos de referencia el suelo y las paredes, eludiendo de esta forma la necesidad de utilizar un patrón de calibración construido para tal efecto.

Dado que en este experimento no se dispone de la transformación real que actúe como *ground truth*, se han calculado las transformaciones relativas en-

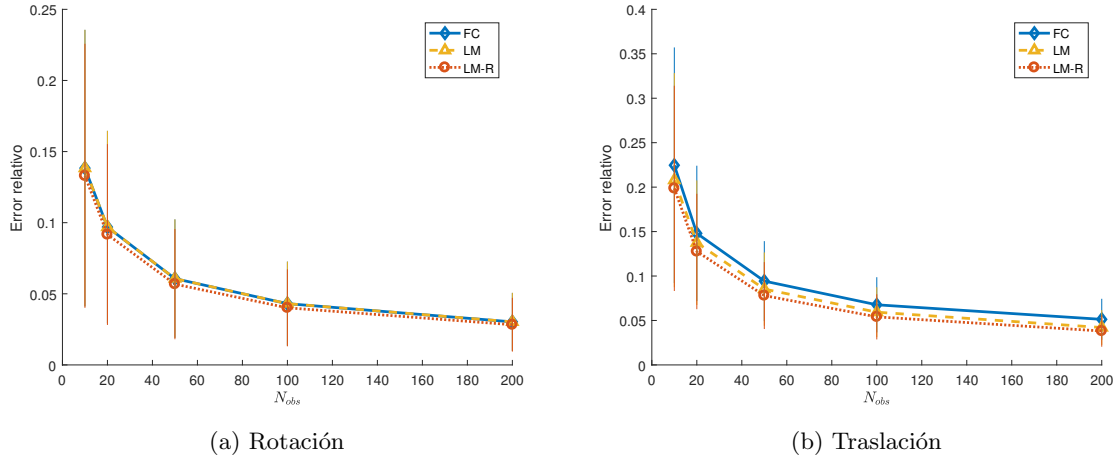


Figura 3: Resultados obtenidos en simulación variando el número de observaciones N_{obs} , para el error en la rotación (4a) y en la traslación (4b), expresado en términos de error relativo.

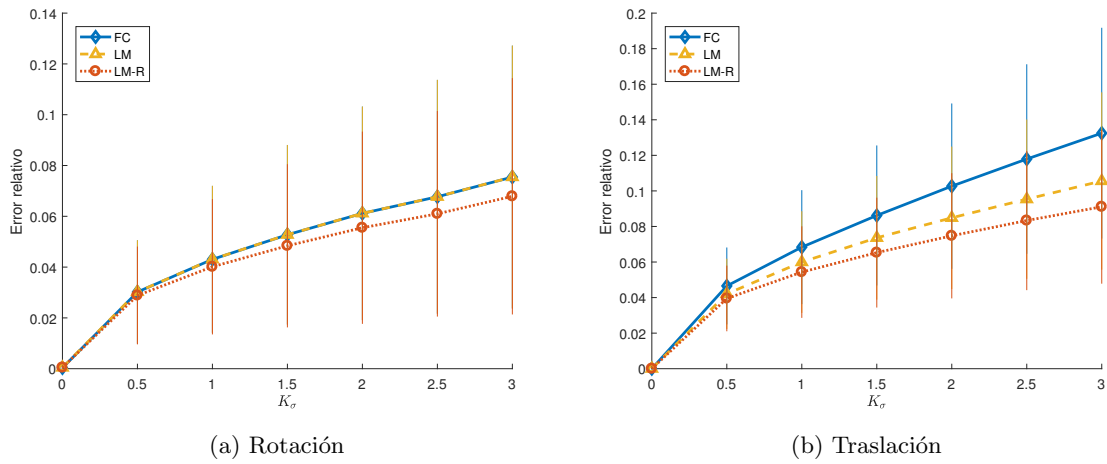


Figura 4: Resultados de simulación obtenidos variando el nivel de ruido K_σ , para el error en la rotación (4a) y en la traslación (4b), expresado en términos de error relativo.

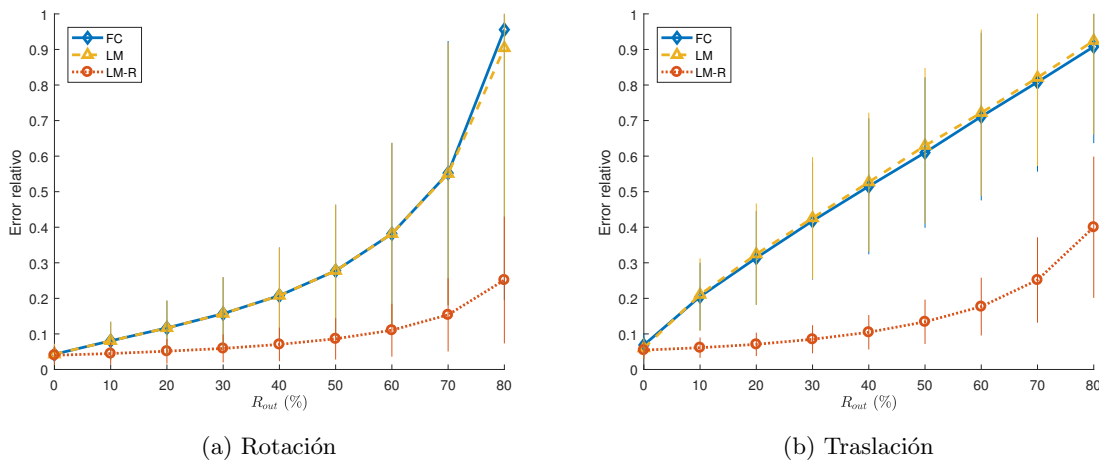


Figura 5: Resultados obtenidos variando la proporción de *outliers* R_{out} , para el error en la rotación (4a) y en la traslación (4b), expresado en términos de error relativo.

tre pares de cámaras ($\xi_0^1, \xi_0^2, \xi_2^1$) y se han comparado las transformaciones estimadas con las obtenidas mediante la composición de las otras dos transformaciones relativas, calculando el error del *cierre de bucle* mediante:

$$\varepsilon = (\xi_0^2 \oplus \xi_2^1) \ominus \xi_0^1 \quad (14)$$

En la Tabla 1 se muestran los errores obtenidos al evaluar los parámetros de calibración mediante el procedimiento descrito anteriormente. Si bien los tres métodos presentan errores similares, el método LM-R se ha empleado sin ninguna estimación inicial de los parámetros, mientras que en los otros dos métodos precisan una estimación inicial para descartar falsas correspondencias entre planos observados.

Tabla 1: Errores en el cierre de bucle tras estimar las transformaciones por parejas y medir su diferencia.

	τ_{err}	ω_{err}
FC	0.06 m	7.92°
LM	0.04 m	7.3°
LM-R	0.04 m	7.02°

6. Conclusiones

En este artículo se ha abordado el problema de la calibración extrínseca de un conjunto de cámaras RGB-D que forman un sólido rígido mediante el método de formulación cerrada propuesto en [7], un método basado en una solución iterativa y la extensión de este último con una formulación robusta en presencia de *outliers* y medidas altamente ruidosas.

Para ello se ha realizado un estudio comparativo de los errores cometidos por los tres métodos en un entorno simulado con condiciones cambiantes de niveles de ruido, número de observaciones, proporción de *outliers* en las observaciones y posiciones relativas de los sensores. Los experimentos muestran una mayor precisión de nuestra variante robusta del método iterativo en todos los escenarios analizados.

En un segundo experimento, los tres métodos han sido evaluados para una configuración de 3 cámaras RGB-D montadas en un robot real moviéndose en un entorno de oficina. En este experimento se han estimado las transformaciones relativas entre cada par de cámaras y se ha calculado el error existente entre una de las transformaciones estimadas y la obtenida al componer las otras dos. De igual forma, el método iterativo robusto ha demostrado obtener mejores resultados a la hora de estimar las transformaciones de las cámaras.

El código fuente de las librerías de C++ desarrolladas en este artículo ha sido publicado y podrá encontrarse en <http://mapir.uma.es>

Referencias

- [1] Arun, K. S., Huang, T. S., and Blostein, S. D. (1987). Least-squares fitting of two 3-D point sets. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, PAMI-9(5):698–700.
- [2] Blanco, J.-L. (2010). A tutorial on se (3) transformation parameterizations and on-manifold optimization. *University of Malaga, Tech. Rep.*
- [3] Brookshire, J. and Teller, S. (2013). Extrinsic Calibration from Per-Sensor Egomotion. In *Robotics: Science and Systems VIII*, pages 504–512. MIT Press.
- [4] Endres, F., Hess, J., Sturm, J., Cremers, D., and Burgard, W. (2014). 3-D mapping with an RGB-D camera. *IEEE Transactions on Robotics*, 30(1):177–187.
- [5] Fankhauser, P., Bloesch, M., Rodriguez, D., Kaestner, R., Hutter, M., and Siegwart, R. (2015). Kinect v2 for mobile robot navigation: Evaluation and modeling. In *Advanced Robotics (ICAR), 2015 International Conference on*, pages 388–394. IEEE.
- [6] Fernández-Moral, E., Gonzalez-Jimenez, J., and Arévalo, V. (2015). Extrinsic Calibration of 2D Laser Rangefinders from Perpendicular Plane Observations. *International Journal of Robotics Research*, online.
- [7] Fernandez-Moral, E., Gonzalez-Jimenez, J., Rives, P., and Arevalo, V. (2014). Extrinsic calibration of a set of range cameras in 5 seconds without pattern. In *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 429–435. IEEE.
- [8] Gomez-Ojeda, R., Briaes, J., Fernandez-Moral, E., and Gonzalez-Jimenez, J. (2015). Extrinsic calibration of a 2d laser-rangefinder and a camera based on scene corners. In *Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on*, pages 3611–3616. IEEE.
- [9] Gomez-Ojeda, R. and Gonzalez-Jimenez, J. (2016). Robust stereo visual odometry through a probabilistic combination of points and line segments. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 2521–2526.
- [10] Ha, J.-E. (2012). Extrinsic calibration of a camera and laser range finder using a new calibration structure of a plane with a triangular hole. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 10(6):1240–1244.

- [11] Moré, J. J. (1978). The Levenberg-Marquardt algorithm: implementation and theory. In *Numerical analysis*, pages 105–116. Springer.
- [12] Moreno, F.-A., Blanco, J.-L., and González-Jiménez, J. (2013). ERODE: An efficient and robust outlier detector and its application to stereovisual odometry. In *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*, pages 4691–4697. IEEE.
- [13] Nex, F. and Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied geomatics*, 6(1):1–15.
- [14] Nguyen, C. V., Izadi, S., and Lovell, D. (2012). Modeling kinect sensor noise for improved 3d reconstruction and tracking. In *3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT), 2012 Second International Conference on*, pages 524–530. IEEE.
- [15] Schneider, S., Luetzel, T., and Wuensche, H. J. (2013). Odometry-based online extrinsic sensor calibration. In *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1287–1292.
- [16] Sorkine, O. (2009). Least-squares rigid motion using SVD. *Technical notes*, 120(3):52.
- [17] Staranowicz, A., Brown, G. R., Morbidi, F., and Mariottini, G. L. (2014). *Easy-to-Use and Accurate Calibration of RGB-D Cameras from Spheres*, pages 265–278. Springer Berlin Heidelberg.
- [18] Svoboda, T., Martinec, D., and Pajdla, T. (2005). A convenient multicamera self-calibration for virtual environments. *PRESENCE: teleoperators and virtual environments*, 14(4):407–422.
- [19] Taylor, Z. and Nieto, J. (2015). Motion-based calibration of multimodal sensor arrays. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 4843–4850.

Colaboradores

